Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Influência do íon acompanhante nos parâmetros de transporte do nitrato no solo

Lívia Previatello da Silva

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2013

Lívia Previatello da Silva
Engenheira Agrícola e Ambiental

Influência do íon acompanhante nos parâmetros de transporte do nitrato no solo

Orientador:
Prof. Dr. **JARBAS HONORIO DE MIRANDA**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP

Silva, Lívia Previatello da
Influência do íon acompanhante nos parâmetros de transporte do nitrato no solo / Lívia Previatello da Silva.- - Piracicaba, 2013.
105 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Lixiviação 2. BTC 3. Deslocamento miscível 4. STANMOD I. Título

CDD 631.43
S586i

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

DEDICATÓRIA

Dedico

Aos meus pais, Jorge Luiz Bezerra da Silva e Márcia Previatello da Silva, pelo apoio, compreensão e amor;

Aos meus irmãos, Ana Carolina Previatello da Silva, Marília Previatello da Silva e Vinícius Previatello da Silva (in memorian);

À minha família, em especial à minha avó Gilda Borim, e aos meus amigos, pela compreensão da distância e da ausência.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, irmãos e familiares;

Aos meus amigos;

Ao meu orientador Prof. Dr. Jarbas Honorio de Miranda;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, pela oportunidade;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa.

Aos professores Sérgio Nascimento Duarte, Tarlei Arriel Botrel, Quirijn de Jong van Lier, Patrícia Angélica Alves Marques e ao meu orientador de graduação Marcus Metri Correa pelo ensino e aprendizagem;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas, Gilmar Batista Grigolon, Paula Alessandra Bonassa Pedro, Antônio Agostinho Gozzo (Seu Antônio), Luiz Fernando Novello, Ângela Márcia Derigi Silva, Francisco Bernardo Dias, Davilmar Aparecida Colevatti, Hélio de Toledo Gomes, Luiz Custódio Camargo e Agnaldo Ferraz Degaspari.

Em especial aos amigos que proporcionaram vários momentos de alegria, descontração, conselhos e desabafos, Rafaelly Suzanye da Silva Santos, Bruna Botin Nascimento, Bruno Marçal de Almeida, Conan Ayade Salvador, Jefferson Vieira José. A todas as pessoas que conheci no departamento e durante as disciplinas, Ana Paula Alves Barreto Damasceno, Alan Bernard Oliveira de Sousa, André Herman, Marcos Alex, Marcos Amaral, João Paulo Francisco, Bruno Lena, Vanessa Grah e outros que não foram mencionados. Aos colegas de salinha, Elenilson Moreira Franco, Isaac de Matos Ponciano e,

em especial ao Luciano Alves Oliveira (Barão), no auxílio das coletas de solo e no desenvolvimento do experimento.

EPÍGRAFE

“Algumas das maiores lições são aprendidas com erros cometidos.

Os erros do passado são a sabedoria do futuro.”

(Dale Turner)

SUMÁRIO

RESUMO 11
ABSTRACT 13
LISTA DE FIGURAS 18
LISTA DE TABELAS 15
1 INTRODUÇÃO 19
2 DESENVOLVIMENTO 21
2.1 Revisão bibliográfica 21
2.1.1 Aspectos sobre a água 21
2.1.2 Fertirrigação 21
2.1.3 Aspectos sobre o nitrato 22
2.1.4 Dinâmica de solutos e transporte de solutos no solo 25
2.1.5 Parâmetros de transporte de solutos no solo 29
2.1.6 Breakthrough Curves (BTC) 31
2.2 Material e métodos 32
2.2.1 Etapa 1 - Algumas considerações sobre o modelo STANMOD 33
2.2.2 Etapa 2 - Obtenção dos parâmetros de transporte em laboratório por análise das BTC em amostras deformadas e indeformadas 35
2.2.3 Etapa 3 - Análise dos resultados pela interpretação dos valores dos parâmetros de transporte nas amostras deformadas e indeformadas 41
2.3 Resultados e discussão 42
2.3.1 Amostras de solos deformadas para nitrato de cálcio 42
2.3.2 Amostras de solos deformadas para nitrato de amônio 45
2.3.3 Amostras de solos deformadas para o nitrato de potássio 48
2.3.4 Amostras de solos indeformadas para nitrato de cálcio 54
2.3.5 Amostras de solos indeformadas para nitrato de amônio 56
2.3.6 Amostras de solo indeformadas para nitrato de potássio 59
3 CONCLUSÕES 67
REFERÊNCIAS 69
ANEXOS 77

RESUMO

Influência do íon acompanhante nos parâmetros de transporte do nitrato no solo

Com a atual preocupação ambiental e a necessidade de se conhecer os processos que regem o movimento da água e de solutos no solo, são necessários estudos que possibilitem aumentar a eficiência do uso de insumos no setor agrícola, que de certa forma possam mitigar o impacto das atividades deste setor sobre contaminação de águas subterrâneas. Portanto, objetivou-se com a presente pesquisa verificar os parâmetros de transporte do íon nitrato, diante de uma análise da influência dos respectivos íons acompanhantes, a partir de fontes distintas de nitrato, em seu deslocamento, com a elaboração de curvas de distribuição de efluentes (Breakthrough Curves (BTC)), em condições de amostras de solo deformadas e indeformadas. O trabalho foi realizado em condições de solo saturado e regime permanente, via aplicação de uma solução de nitrato na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^-, por três diferentes fontes ($Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3), para dois tipos distintos de solos tropicais: Latossolo Vermelho Amarelo e Nitossolo Vermelho. O experimento foi conduzido no Laboratório de Solos e Qualidade de Água, do Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", em Piracicaba – SP. Os parâmetros de transporte do íon nitrato na concentração de 50 g m^{-3} nos respectivos solos foram obtidos por um ajuste numérico utilizando-se o software STANMOD. Pelos resultados obtidos, pôde-se verificar que o deslocamento do nitrato está atrelado com as caraterísticas dos solos e que houve maiores efeitos de lixiviação para o Nitossolo Vermelho. Em termos da influência dos cátions acompanhantes do nitrato, em suas diferentes fontes distintas, pode-se dizer que não foram observados seus efeitos na mobilidade do nitrato no perfil do solo.

Palavras-chave: Lixiviação; BTC; Deslocamento miscível; STANMOD

ABSTRACT

Influence of accompanying ion on transport parameters of the nitrate in soil

With the current environmental concerns and the need to understand the processes that govern the movement of water and solutes in soil, studies are needed to allow increasing the efficiency of input use in agriculture that somehow can mitigate the impact of activities of this sector on groundwater contamination. Therefore, the objective of this work was to verify the transport parameters of the nitrate, by analyzing the influence of the accompanying cation on nitrate displacement, through the development of distributions curves of effluents (Breakthrough Curves (BTC)), under conditions of disturbed and undisturbed samples in saturated soil and steady state conditions, via application of nitrate solution at a concentration of 50 g m^{-3} NO_3^-, by three different sources ($Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 and KNO_3) and for two types of tropical soils: Yellow Oxisol and Anfisol. The experiment was conducted in the Laboratory of Soil and Water Quality, Department of Biosystems Engineering from Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba - SP. The transport parameters of the nitrate at a concentration of 50 g m^{-3} in their respective soils were obtained by a numerical fit using the software STANMOD. From the results, it could be seen that the nitrate displacement is linked with the soil characteristics and the leaching was higher in Anfisol. In terms of the influence of accompanying cations of nitrate, in its various different sources, it can be said that their effects were not observed in nitrate mobility in the soil profile.

Keywords: Leaching; BTC; Miscible displacement; STANMOD

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Detalhes da coleta das amostras indeformadas das colunas de solos (a) Trado Josefina, utilizado nas coletas das amostras indeformadas; (b) coleta de amostra indeformada; (c) tubo de PVC com a amostra de solo indeformado em seu interior; (d) amostra após o corte e furo para o dreno; (e) coluna PVC com amostra de solo indeformada em seu interior, detalhe do dreno na parte inferior e do "cap" externo de encaixe na parte inferior; (f) detalhe da amostra de solo indeformada após o corte do tubo de PVC. 39

Figura 2 - Esquema montado em laboratório para elaboração das Breakthrough Curves, visando a obtenção dos parâmetros de transporte de solutos: fator de retardamento (R), número de Peclet (P), coeficiente de dispersão (D) e dispersividade (λ) 40

Figura 3 - Curvas de distribuição de nitrato para a fonte de nitrato $Ca(NO_3)_2$, observadas e ajustadas pelo modelo STANMOD, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^-, das amostras de solo deformadas para os solos S1 e S2 (em que C/C_0 é a concentração relativa e VP é o volume da solução dividido pelo volume de poros da coluna)... 43

Figura 4 - Curvas de distribuição de nitrato para a fonte de nitrato NH_4NO_3, observadas e ajustadas pelo modelo STANMOD, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^-, das amostras de solo deformadas para os solos S1 e S2 (em que C/C_0 é a concentração relativa e VP é o volume da solução dividido pelo volume de poros da coluna) .. 47

Figura 5 - Curvas de distribuição de nitrato para a fonte de nitrato KNO_3, observadas e ajustadas pelo modelo STANMOD, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^-, das amostras de solo deformadas para os solos S1 e S2 (em que C/C_0 é a concentração relativa e VP é o volume da solução dividido pelo volume de poros da coluna).. 49

Figura 6 - Curvas de distribuição de nitrato para a fonte de nitrato $Ca(NO_3)_2$, observadas e ajustadas pelo modelo STANMOD, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^-, das amostras de solo indeformadas para o solo S1 (em que C/C_0 é a concentração relativa e VP é o volume da solução dividido pelo volume de poros da coluna). . 55

Figura 7 - Curvas de distribuição de nitrato para a fonte de nitrato NH_4NO_3, observadas e ajustadas pelo modelo STANMOD, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^-, das amostras de solo indeformadas para o solo S1 (em que C/C_0 é a concentração relativa e VP é o volume da solução dividido pelo volume de poros da coluna).. 58

Figura 8 - Curvas de distribuição de nitrato para a fonte de nitrato KNO_3, observadas e ajustadas pelo modelo STANMOD, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^-, das amostras de solo indeformadas para o solo S1 (em que C/C_0 é a concentração relativa e VP é o volume da solução dividido pelo volume de poros da coluna). 60

Figura 9 - Coeficiente de dispersão (D) em função da velocidade da solução (v), nas amostras de solo, e parâmetros de correlação linear..... 64

Figura 10 - Velocidade da solução nas amostras de deformadas e indeformadas de S1 e deformadas S2 (v) em função da densidade do solo (ρ), e parâmetros de correlação linear 65

Figura 11 - Velocidade da solução nas amostras deformadas e indeformadas de S1 e deformadas de S2 (v) em função do número de Peclet (P), e parâmetros da correlação linear 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização física dos solos estudados: Latossolo Vermelho Amarelo (S1) e Nitossolo Vermelho (S2) 36

Tabela 2 - Análise de micronutrientes dos solos estudados: Latossolo Vermelho Amarelo (S1) e Nitossolo Vermelho (S2) 36

Tabela 3 - Caracterização química dos solos estudados: Latossolo Vermelho Amarelo (S1) e Nitossolo Vermelho (S2) 37

Tabela 4 - Análise do ataque sulfúrico dos solos estudados: Latossolo Vermelho Amarelo (S1) e Nitossolo Vermelho (S2) 38

Tabela 5 - Parâmetros de transporte de nitrato nas amostras deformadas de S1 e S2, para o soluto $Ca(NO_3)_2$, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^- 44

Tabela 6 - Estatística descritiva dos parâmetros de transporte de NO_3^- nas amostras deformadas de S1 e S2 para $Ca(NO_3)_2$ 45

Tabela 7 - Parâmetros de transporte de nitrato nas amostras deformadas de S1 e S2, para o soluto NH_4NO_3, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^- 46

Tabela 8 - Estatística descritiva dos parâmetros de transporte de NO_3^- nas amostras deformadas de S1 e S2 para NH_4NO_3 48

Tabela 9 - Parâmetros de transporte de nitrato nas amostras deformadas de S1 e S2, para o soluto KNO_3, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^- 50

Tabela 10 - Estatística descritiva dos parâmetros de transporte de NO_3^- nas amostras deformadas de S1 e S2 para KNO_3 51

Tabela 11 - Resumo da análise de variância (quadrado médio) para amostras deformadas de S1 entre $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3 52

Tabela 12 - Resumo da análise de variância (quadrado médio) para amostras deformadas de S2 entre $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3 53

Tabela 13 - Resumo da análise de variância (quadrado médio) para amostras deformadas de S1 e S2 entre $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3 53

Tabela 14 - Teste de comparação múltipla de médias para os principais parâmetros de transporte de nitrato entre amostras deformadas de S1 e S2 para $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3 54

Tabela 15 - Parâmetros de transporte de nitrato nas amostras indeformadas de S1, para o soluto $Ca(NO_3)_2$, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^- 56

Tabela 16 - Estatística descritiva dos parâmetros de transporte de NO_3^- na amostra indeformada de S1 para $Ca(NO_3)_2$ 56

Tabela 17 - Parâmetros de transporte de nitrato nas amostras indeformadas de S1, para o soluto NH_4NO_3, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^- 57

Tabela 18 - Estatística descritiva dos parâmetros de transporte de NO_3^- na amostra indeformada de S1 para NH_4NO_3 57

Tabela 19 - Parâmetros de transporte de nitrato nas amostras indeformadas de S1 para o soluto KNO_3, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^- 59

Tabela 20 - Estatística descritiva dos parâmetros de transporte de NO_3^- na amostra indeformada de S1 para KNO_3 59

Tabela 21 - Resumo da análise de variância (quadrado médio) para amostras indeformadas de S1 entre $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3 61

Tabela 22 - Resumo da análise de variância (quadrado médio) para amostras deformadas e indeformadas de S1, utilizando os sais $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3 62

Tabela 23 - Teste de comparação múltipla de médias para os principais parâmetros de transporte de nitrato entre amostras deformadas e indeformadas de S1 para $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3 62

1 INTRODUÇÃO

As aplicações de fertilizantes e defensivos contribuem para o aumento da produtividade agrícola. Entretanto, para que sejam eficientes, algumas precauções devem ser tomadas, uma vez que esses insumos, quando não são aplicados corretamente podem causar a contaminação das águas subterrâneas devido à lixiviação.

A lixiviação de nutrientes varia de acordo com os atributos físicos do solo, tais como: textura, estrutura, profundidade do perfil e, principalmente, porosidade. Entre os atributos químicos que afetam a lixiviação, estão a capacidade de retenção de íons e o pH (SANTOS et al., 2002).

Para possibilitar o manejo adequado da aplicação de fertilizantes, é necessário o conhecimento da sua dinâmica no solo, quando aplicados via fertirrigação, minimizando assim os problemas causados devido à aplicação excessiva.

Dentre vários elementos, o nitrogênio é um dos elementos mais requeridos pelas plantas e é absorvido principalmente na forma de nitrato. Este íon é um dos principais poluentes da água, pois é muito susceptível a lixiviação devido à sua fraca interação com os coloides do solo, sendo pouco retido. Pelo fato da fertirrigação aplicar nutrientes diluídos no solo, alguns cuidados são necessários, principalmente quanto ao nitrato, uma vez que seu movimento é aproximadamente proporcional ao movimento da água percolada no solo.

O transporte de solutos no solo compreende um processo complexo, envolvendo aspectos químicos e físicos, sendo de difícil medição no campo. Entretanto, o comportamento das substâncias no solo pode ser estimado mediante o uso de recursos computacionais que utilizam técnicas de resoluções numéricas de equações que descrevem a teoria do transporte de água e solutos no solo. Assim, os usos de modelos de simulação conseguem prever os riscos de contaminação e impactos que um determinado componente químico pode causar ao solo, à água e às plantas (MIRANDA; DUARTE, 2002). Portanto, necessita-se do conhecimento prévio do comportamento das substâncias químicas para sua aplicação em modelos de simulação; logo, a determinação dos parâmetros de transporte de solutos por meio de experimentos em laboratório ou em campo são importantes na caracterização da dinâmica de solutos.

O estudo da movimentação de solutos utilizando colunas de solo, com amostras deformadas e indeformadas em laboratório, compõe uma técnica viável e útil, permitindo o monitoramento do deslocamento de substâncias no perfil do solo e a estimativa dos parâmetros de transporte de solutos no solo. Os ensaios em laboratório são os mais favoráveis

para um melhor entendimento dos fatores que afetam os mecanismos de migração e retenção de contaminantes e, dentre eles, mais especificamente, os ensaios em colunas permitem melhores condições para o desenvolvimento de pesquisas, principalmente pela facilidade do controle das variáveis envolvidas e por não comprometerem o meio ambiente.

Nesse sentido, a presente pesquisa teve como objetivos:

1) Obtenção dos parâmetros de transporte do ânion nitrato mediante a aplicação de três diferentes fontes inorgânicas (nitrato de cálcio ($Ca(NO_3)_2$, nitrato de amônio (NH_4NO_3) e nitrato de potássio (KNO_3)) em dois solos: Latossolo Vermelho Amarelo e Nitossolo Vermelho, em condições de amostras deformadas e indeformadas;

2) Aplicação de uma metodologia de coleta de amostras de solo indeformado em colunas de PVC; e

3) Verificação da existência da influência dos íons acompanhantes cálcio, amônio e potássio no deslocamento do nitrato no perfil do solo.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 Aspectos sobre a água

A água é um dos recursos mais importantes encontrados na natureza. Essencial para a vida no planeta, tanto no sentido de sua fundamental importância para os processos biológicos nos seres vivos, como também pela grande influência que exerce no desenvolvimento das civilizações ao longo da história (MARSON; LEOPOLDO, 1999). O suprimento de "água doce" de boa qualidade é essencial para o desenvolvimento econômico, para a qualidade de vida das populações humanas e para a sustentabilidade dos ciclos no planeta. Os usos múltiplos da água aceleram-se em todas as regiões, continentes e países, aumentando à medida que as atividades econômicas se diversificam e as necessidades de água crescem para atingir níveis de sustentação compatíveis com as pressões da sociedade consumidora e da produção industrial e agrícola (TUNDISI, 2003).

Assim, o crescimento da produção agrícola exige transformações com a introdução de inovações tecnológicas que permitam a melhoria da produtividade das culturas e aumento da competitividade, associada à preservação do meio ambiente e à lucratividade na produção, permitindo benefícios sustentáveis nas explorações agrícolas. Portanto, é conveniente avaliar e adequar cada um dos fatores que compõem o sistema de produção, inclusive o manejo da água de irrigação aplicada nos sistemas produtivos.

2.1.2 Fertirrigação

A fertirrigação é o processo de aplicação simultânea de água e fertilizantes às plantas por meio de um sistema de irrigação, e tem sido amplamente utilizada no Brasil. A adoção desta prática traz diversas vantagens ao agricultor: maior eficiência e economia de fertilizantes, de mão-de-obra e menores gastos com equipamentos; aplicação da dose correta e no momento adequado, na profundidade adequada; menor risco de perdas; maior facilidade de aplicação; maior versatilidade de uso em qualquer tipo de solo (COSTA et al., 1986; MAROUELLI et al., 1996; ALVARENGA, 1999).

O bom planejamento da fertirrigação possibilita o uso mais eficiente da água e dos nutrientes por ela carreados, proporcionando, assim, redução do acúmulo de sais no solo e de desequilíbrios hídricos e nutricionais, bem como minimizando a lixiviação de nutrientes capazes de atingir o lençol freático eutrofizando os cursos d'água (LOPEZ, 2000). A utilização desta técnica permitiu a otimização dos insumos em diferentes culturas irrigadas, tanto em aspectos relacionados com à produtividade quanto qualidade dos produtos obtidos, sendo a mais notável a sua aprovação em culturas irrigadas por sistemas de irrigação por gotejamento (OLIVEIRA; VILLAS BOAS, 2008).

2.1.3 Aspectos sobre o nitrato

A contaminação do solo e das águas subterrâneas e superficiais em áreas com aplicação de fertilizantes e reuso de efluentes está intimamente ligada às características químicas dos materiais, e às propriedades de retenção e transmissão de água e solutos do solo. Segundo Marciano et al. (2001), tais características podem limitar a aplicação desses produtos na Agricultura, sendo de grande importância sua determinação.

A mobilidade de solutos no solo está inversamente relacionada à sua adsorção à fração sólida ou às condições do meio que favoreçam a precipitação dos íons (MATOS et al., 1998). A adsorção iônica ao complexo de troca do solo faz com que os íons mantenham intercâmbio com a solução do solo, proporcionando ora sua retenção junto à fração sólida, ora sua disponibilização no meio aquoso.

A presença de cátions diversos na solução do solo proporciona a competição entre eles pelos sítios de adsorção, favorecendo a lixiviação daqueles que não são retidos, fato que constitui um alerta quanto ao perigo de contaminação dos mananciais de água subterrânea, principalmente no que diz respeito aos metais pesados. Mitchell (1965), citado por Ferreira e Cruz (1991) determinou a seguinte ordem de dificuldade de deslocamento de cátions adsorvidos aos minerais de argila: Cu > Pb > Ni > Co > Zn > Ba > Rb > Sr > Ca > Mg > Na > Li.

O nitrogênio é um macronutriente que estimula o crescimento, atrasa a senescência e muda a morfologia das plantas e, além disso, o aumento nos níveis de adubação nitrogenada causa um aumento significativo no conteúdo de clorofila das folhas (FERNÁNDEZ et al., 1994).

Segundo Resende (2002), das diversas formas de nitrogênio presentes na natureza, a amônia (NH_3) e, em especial, o nitrato (NO_3^-) podem possibilitar a perda de qualidade da

água, tornando-a imprópria para alguns usos. Embora a amônia, quando presente na água em altas concentrações, possa ser tóxica, quando ela é originada no solo ou aplicada via fertilizante tende a ser rapidamente convertida em amônio (NH_4^+) e esse, por sua vez, é convertido a nitrato pelo processo microbiológico da nitrificação. Segundo o autor, o nitrato é a principal forma de nitrogênio associada à contaminação da água pelas atividades antrópicas; isso ocorre porque o ânion nitrato, caracterizado por ser fracamente retido nas cargas positivas dos coloides, tende a permanecer mais em solução, principalmente, nas camadas superficiais do solo, nas quais a matéria orgânica acentua o caráter eletronegativo da fase sólida, repelindo o nitrato e fazendo com que os fosfatos presentes ocupem as cargas positivas disponíveis. Segundo Alcântara e Camargo (2005), do ponto de vista eletroquímico, existe uma grande diferença entre a adsorção de nitrato ao solo e a de outros oxiânions, pois ele não é adsorvido especificamente, sendo sua adsorção apenas eletrostática, dependente exclusivamente da carga do solo.

O nitrato presente na solução do solo está facilmente disponível ao processo de lixiviação e, ao longo do tempo, pode haver considerável incremento no teor de nitrato nas águas subterrâneas (RESENDE, 2002). Sendo assim, a alta mobilidade do nitrato no solo justifica a preocupação em relação ao manejo da adubação nitrogenada em solos agrícolas (VANOTTI; BUNDY, 1994). Essa lixiviação tem estreita dependência com a água que percola no perfil do solo, segundo as estimativas de Wild (1972). E em concordância, Ceretta (1997) afirma que a lixiviação de nitrato é um fenômeno físico, favorecido pela baixa energia envolvida em sua adsorção às partículas do solo e também pela sua alta solubilidade em água. Esta alta solubilidade e a fraca interação com a matriz do solo possibilitam que o ânion acompanhe a frente de umedecimento da água no solo; assim, o nitrato tanto pode movimentar para direção vertical, no sentido descendente, sob condições de excessiva precipitação ou irrigação, quanto no sentido ascendente, por capilaridade, durante estações extremamente secas (MUCHOVEJ; RECHCIGL, 1994).

A lixiviação determina a perda de nutrientes da zona radicular para camadas mais profundas do perfil do solo, tornando-os indisponíveis para os cultivos. O volume de água percolado tem sido relatado como o principal responsável pelas perdas de nutrientes. A lixiviação de nutrientes varia com os atributos físicos do solo, como textura, estrutura, profundidade do perfil e, principalmente, porosidade. Dentre os atributos químicos que afetam a lixiviação estão a capacidade de troca de cátions (CTC) e o potencial hidrogeniônico (pH). Solos com alta CTC apresentam maior capacidade de adsorção dos cátions, tornando-os menos suscetíveis à lixiviação. Com o aumento do pH, a CTC do solo se eleva e,

consequentemente, os cátions disporão de maior número de cargas para adsorção (SANTOS et al., 2002). De acordo com Muchovej e Rechcigl (1994), a textura do solo e o conteúdo de matéria orgânica têm maior influência nas perdas por lixiviação, logo, solos de textura mais grosseira e de baixo conteúdo de matéria orgânica tendem a permitir maiores perdas de nitrato por lixiviação, enquanto as menores perdas devem ocorrer em solos argilosos; por isso o nitrato tem sido o composto mais estudado em solos arenosos, principalmente em razão da rápida percolação e possibilidade de atingir o lençol freático em quantidades superiores aos observados em solos de características argilosas.

Alcântara e Camargo (2005) verificaram adsorção de nitrato por cargas positivas do solo, o que retardou sua movimentação em relação ao avanço da água. Donn e Menzies (2005a, 2005b) estudaram a lixiviação de nitrato em subsolos profundos e ricos em óxidos de ferro e observaram retardamento da lixiviação proporcional à quantidade de cargas positivas do solo. Deste modo, o movimento deste íon no solo foi afetado diretamente pelos fatores que modificam o movimento da água no solo, como a porosidade e a estrutura (ALCÂNTARA; CAMARGO, 2005).

De acordo com Taylor e Neal (1982), a principal preocupação no tocante à saúde pública com a oxidação de compostos amoniacais em nitrato deve-se à possibilidade de causar enfermidades pelo consumo de água contaminada (cianose infantil ou metahemoglobinemia e câncer no estômago), quando grandes quantidades desse ânion alcançam os lençóis freáticos e cursos de água. Do ponto de vista ambiental, a preocupação quanto à introdução de teores acima do limite aceitável de nitrato nos lençóis freáticos seria o risco de eutrofização de mananciais (BURT et al., 1993).

O deslocamento de fluídos miscíveis é um processo que ocorre quando um fluido mistura-se com outro fluido (residente no solo) e o desloca; um exemplo é quando a água de irrigação mistura-se com a solução do solo e a desloca no perfil. O estudo do deslocamento de fertilizantes e pesticidas para partes mais profundas do perfil ameaça a qualidade da água freática, além de torná-los indisponíveis às culturas; portanto, a aplicação correta de insumos agrícolas contribui para a preservação ambiental (BORGES JÚNIOR; FERREIRA, 2006).

Nielsen e Biggar (1962) estudaram o deslocamento miscível em vários tipos de materiais porosos sob condições saturadas e insaturadas, e tipos diferentes de velocidades de fluxos. De acordo com esses autores, o deslocamento do elemento depende intimamente da característica do solo e do volume de água aplicado em solo saturado ou insaturado. Nielsen e Biggar (1962) relatam em seus estudos a movimentação de elementos, como o trítio e o cloro e nos resultados obtidos; consideram uma maior movimentação do trítio em relação ao cloro

devido a melhor interação desse sal com as condições físicas e químicas do solo, bem como da quantidade de fluxo aplicado.

O processo da dinâmica do nitrato nos solos tem sido estudado devido à alta mobilidade desse íon no solo, acarretando em perdas de nutrientes e contaminação das águas subterrâneas. Anami et al. (2008) estudaram o deslocamento miscível de nitrato e fosfato em colunas de solo pela aplicação de água residuária proveniente da suinocultura. Santos et al. (2009) analisaram a distribuição de nitrato em colunas de Neossolo Quartzarênico (RQ) e Latossolo Vermelho (LV) fertirrigadas com nitrato de cálcio com o uso de TDR. Alcântara e Camargo (2010) avaliaram a influência do pH e da adição de carbonatos, fosfatos e sulfatos na movimentação do nitrato, em colunas constituídas do horizonte subsuperficial de um Latossolo Vermelho Acriférrico. Entretanto, existem poucos estudos avaliando a distribuição de nitrato em colunas de solo, avaliando o comportamento de diferentes fontes de nitrato.

2.1.4 Dinâmica de solutos e transporte de solutos no solo

Os teores recuperados de vários elementos químicos na solução percolada através de colunas de solo têm sido utilizados em vários trabalhos para quantificar a sua movimentação (OLIVEIRA et al., 2001; PRATA et al., 2003; ALCÂNTARA; CAMARGO, 2004; BARIZON et al., 2006; ANAMI et al., 2008; GONÇALVES et al., 2008; DOLTRA; MUÑOZ, 2010; SILVA et al., 2012). Recentemente, tem-se estudado tal mobilidade utilizando-se modelos físico-matemáticos (BORGES JÚNIOR; FERREIRA, 2006; TRIVEDI; BABADAGLI, 2008; FONSECA et al., 2009; ROSE et al., 2009). Tais modelos são resultantes de soluções da equação diferencial de transporte de solutos no solo em relação ao avanço da interface entre o líquido deslocador e o deslocado, e têm como base os três componentes que descrevem o transporte de solutos.

O entendimento dos componentes do processo de transporte de soluto, que ocorrem concomitantemente, é de fundamental importância para o estabelecimento de práticas de manejo para o controle do movimento de íons no solo (BRESLER, 1981).

Os estudos da dinâmica dos solutos não proporcionam somente um meio de determinação do fluxo no solo, mas devem dar uma explicação física do fenômeno que ocorre na percolação, na troca e adsorção de íons, para o movimento de fertilizantes minerais e outros sais (NIELSEN; BIGGAR, 1961).

O transporte convectivo, ou convecção, também conhecido como advecção e fluxo de massa, refere-se ao movimento passivo do soluto com a água, ou seja, sendo arrastado pelo

fluxo de água. Na ausência de difusão e adsorção, água e soluto movem-se na mesma taxa média. Na direção vertical, o transporte convectivo do soluto pode ser descrito por:

$$J_m = q_z . C \tag{1}$$

em que:

J_m – densidade de fluxo convectivo (M L^{-2} T^{-1});

q_z – densidade de fluxo de água (L T^{-1});

C – concentração do soluto na fase líquida do solo (M L^{-3}).

A difusão é um processo espontâneo resultante do movimento térmico natural de íons e moléculas dissolvidas. O transporte difusivo no solo tende a diminuir os gradientes de concentração existentes, e em analogia com a lei de Fick, pode ser descrita por:

$$J_D = -\theta . D_m . \frac{\partial C}{\partial z} \tag{2}$$

em que:

J_D – densidade de fluxo difusivo (M L^{-2} T^{-1});

θ – umidade volumétrica do solo (L^3 L^{-3});

D_m – coeficiente de difusão molecular (L^2 T^{-1}).

O coeficiente de difusão molecular no solo é determinado considerando a tortuosidade do meio poroso e a difusão molecular do soluto em água, ou seja:

$$D_m = \tau . D_O \tag{3}$$

em que:

τ – fator de tortuosidade (adimensional);

D_O – coeficiente de difusão molecular em água pura (L^2 T^{-1}).

O transporte dispersivo resulta do fato de que as velocidades do fluido no interior dos poros individuais e entre poros de diferentes formas, tamanhos e orientações difere-se da velocidade média da água nos poros. Em nível microscópico, há uma distribuição de velocidades nos poros devido à resistência fraccional causada pelas superfícies sólidas do material poroso, bem como pelo avanço diferenciado da frente de molhamento. Esta distribuição é semelhante à distribuição de velocidade encontrada nas seções de tubulações de

condutos forçados, e proporciona a movimentação do soluto sob diferentes taxas, o que conduz a um processo de mistura que é macroscopicamente semelhante à mistura provocada pelo processo de difusão (van GENUCHTEN; WIERENGA, 1986). Porém, ao contrário da difusão química que acontece mesmo sem fluxo, a dispersão ocorre somente com o movimento da água. Experimentos de campo e de laboratório demonstram que o transporte por dispersão na direção vertical pode ser escrito como:

$$J_h = -\theta . D_h . \frac{\partial C}{\partial z} \tag{4}$$

em que:

J_h – densidade de fluxo dispersivo (M L^{-2} T^{-1});

D_h – coeficiente de dispersão mecânica (L^2 T^{-1}).

Geralmente, assume-se que o coeficiente de dispersão mecânica como sendo função da velocidade da solução.

$$D_h = \lambda . v^n \tag{5}$$

em que:

λ – dispersividade do solo (L);

v – velocidade da água no solo (L T^{-1}).

O coeficiente "n" na equação anterior é um parâmetro empírico, para qual se utiliza normalmente o valor unitário (van GENUCHTEN; WIERENGA, 1986).

Dada a similaridade macroscópica entre a difusão molecular e a dispersão mecânica, os coeficientes "D_m" e "D_h" são frequentemente considerados aditivos, e assim, ao resultado, D, dá-se o nome de coeficiente de dispersão longitudinal hidrodinâmica, mais referido simplesmente como coeficiente de dispersão.

$$D = D_m + D_h \tag{6}$$

Outros termos usados para D são coeficiente de difusão aparente (NIELSEN et al., 1972; BOAST, 1973), e coeficiente de dispersão-difusão (HILLEL, 1980), enquanto que o termo coeficiente de dispersão hidrodinâmica algumas vezes tem sido reservado apenas para D_h (SHAMIR; HARLEMAN, 1966; NIELSEN et al., 1972; BOAST, 1973).

Combinando as equações (1), (2), (4) e (6), obtém-se a seguinte equação para a densidade de fluxo de solutos no solo, na direção vertical:

$$J_S = -\theta.D.\frac{\partial C}{\partial z} + q.C \tag{7}$$

em que:

J_S – densidade de fluxo de solutos no solo (M L^{-2} T^{-1}).

O balanço de solutos no solo, em uma dimensão, é regido pela equação da continuidade (van GENUCHTEN; WIERENGA, 1986), ou seja:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta.C + \rho.S) = -\frac{\partial J_S}{\partial z} \tag{8}$$

em que:

S – concentração do soluto adsorvida na fase sólida do solo (M M^{-1});

ρ – massa específica do solo (M L^{-3});

t – tempo (T).

Substituindo a equação (7) na (8) resulta na equação de transporte de solutos no solo, obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta.C + \rho.S) = \frac{\partial}{\partial z}(\theta.D\frac{\partial C}{\partial z} - q_z.C) \tag{9}$$

Os dois termos do lado esquerdo da equação, situados entre parênteses, referem-se, respectivamente, às mudanças no tempo, nas concentrações dos solutos associados às fases líquida e sólida do solo.

Assume-se que S e C podem ser relacionados por uma relação linear ou isoterma linear de equilíbrio, com forma:

$$S = k.C \tag{10}$$

em que:

S – coeficiente empírico de distribuição (M^{-1} L^{3}).

Para linearizar a adsorção e o fluxo dinâmico de água em um perfil de solo homogêneo, assume-se que θ e q são constantes no tempo e no espaço, e a equação (9) se reduz a:

$$R\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v\frac{\partial C}{\partial z} \tag{11}$$

em que R (adimensional) é o fator de retardamento, definido como

$$R = 1 + \frac{\rho.k}{\theta} \tag{12}$$

Se não há interação entre soluto e o solo, k assume o valor de zero e R torna-se igual a 1 (um). Em alguns casos, R pode ser menor que 1, indicando que apenas uma fração da fase líquida participa do processo de transporte. Isso pode ocorrer quando a substância está sujeita a exclusão aniônica ou quando há presença relativa de regiões de água imóvel, por exemplo, dentro de agregados densos, que não contribuem para o transporte convectivo. No caso de exclusão de ânions, $(1 - R)$ pode ser entendido como volume relativo de exclusão de ânions.

2.1.5 Parâmetros de transporte de solutos no solo

Para uma descrição do transporte de solutos nos solos há necessidade de se utilizar modelos desenvolvidos para condições transientes durante o transporte, mas normalmente, os parâmetros desses modelos são estimados pelo ajuste dos resultados experimentais, sob uma condição específica de fluxo (ÁLVAREZ-BENEDÍ et al., 1999).

Segundo van Genuchten e Wierenga (1986), vários modelos teóricos têm sido desenvolvidos ao longo dos anos para descrever o transporte de solutos no solo. O sucesso desses modelos, porém, depende em grande parte da capacidade em se quantificar os parâmetros de transporte, os quais são variáveis de entrada. Os parâmetros mais importantes são o fluxo do fluido, o coeficiente de dispersão (D) e o fator de retardamento (R). Dentre os programas desenvolvidos para tal fim pode-se destacar o modelo CXTFIT (TORIDE et al., 1995), de ampla utilização, aplicado para a estimativa dos parâmetros a partir de concentrações observadas (problema inverso) ou para prever a concentração de solutos (problema direto), usando equações de convecção-dispersão como modelo de transporte,

utilizando um método de otimização não linear (minimização da soma dos desvios) para a obtenção dos parâmetros.

Outro modelo frequentemente utilizado no Brasil é o “DISP” (BORGES JÚNIOR; FERREIRA, 2002), que utiliza o método dos mínimos quadrados para a obtenção dos parâmetros de transporte: número da coluna ou número de Peclet (P) e fator de retardamento (R). O “DISP” emprega um método que consiste em adotar os estimadores que minimizam a soma dos quadrados dos desvios (Rs), entre os valores estimados e observados da concentração relativa $C_e = C/C_0$, em que C é concentração coletada do efluente e C_0 é a concentração inicial em relação ao número do volume de poros (VP).

Adicionalmente, ressalta-se ainda o modelo STANMOD (Studio of Analytical Models) (ŠIMŮNEK et al., 2008), que, além de verificar o ajuste entre os dados experimentais e os simulados pelo modelo, fornece dois importantes parâmetros de transporte: o fator de retardamento (R) e o coeficiente de dispersão (D). A versão 1.0 do STANMOD inclui atualmente os seguintes modelos: CXTFIT 2.0 (TORIDE et al., 1995), CFITM (van GENUCHTEN, 1980), CFITIM (van GENUCHTEN, 1981) e CHAIN (van GENUCHTEN, 1985). A versão 2.0 do STANMOD inclui os modelos 3DADE (LEIJ; BRADFORD, 1994) e N3DADE (LEIJ; TORIDE, 1997). O pacote inclui um software com versão modificada e atualizada do código de CXTFIT de Toride et al. (1995) para estimar os parâmetros de transporte de solutos por intermédio de um método não-linear de otimização de parâmetros de mínimos quadrados. Há um grande número de modelos incorporados a esse software, e refere-se ao seu manual para maiores detalhamentos.

O estudo detalhado do efeito da competição catiônica sobre os valores do fator de retardamento e coeficiente de dispersão, parâmetros de entrada da equação de transporte dispersivo-convectivo, é fundamental para a correta adequação dos modelos de simulação do deslocamento dos solutos no solo.

Campos e Elbachá (1991) definiram o fator de retardamento como a capacidade de retenção ou efeito tampão do solo, para um elemento ou composto existente em um resíduo. Para Valocchi (1984), o fator de retardamento representa a defasagem entre a velocidade de avanço do soluto e a velocidade de avanço da frente de molhamento da solução percolante; desta forma, sendo o fator de retardamento um parâmetro que, indiretamente, expressa a capacidade do solo em reter íons, ou seja, o efeito da adsorção entre solo e soluto, fica clara sua dependência em relação às interações entre a fase líquida e a fase sólida, durante a percolação da solução no solo.

O número de Peclet (P) é um número adimensional utilizado no estudo da difusão através de um meio poroso, utilizado para determinar qual mecanismo (convecção-dispersão ou difusão) domina o processo de transferência de solutos (ROTH, 1996; GONÇALVES, 2007), exprimindo a relação entre a velocidade de transporte por convecção e a velocidade de transporte por difusão molecular. Pequenos valores do número de Peclet indicam que o transporte de difusão domina sobre o transporte de convecção. Para maiores valores do número de Peclet, o transporte de convecção domina sobre o de difusão (WANG, 2002; GONÇALVES, 2007).

Quanto às curvas de distribuição de efluentes (BTC), deve-se analisar um aspecto importante, que é o seu formato e desenvolvimento. Segundo Correa et al. (1999), a proximidade entre os valores estimados e os obtidos experimentalmente, em toda a faixa de variação de C/C_0, mostra a eficiência do modelo dispersivo-convectivo em descrever a mobilidade de soluto nos solos.

Segundo Nielsen e Biggar (1962), o número de volume de poros correspondente à concentração relativa de 0,5 é uma primeira indicação, no sentido da existência ou não de interações soluto-solo. Quando o valor correspondente de 0,5 para C/C_0 é de 1 volume de poros, significa que o soluto não está interagindo com a fração coloidal do solo; por outro lado, quando o valor é maior que 1, isto é, a curva de efluente se apresenta deslocada para a direita, significa que, ao escoar através do perfil do solo, parte do soluto é adsorvida, resultando em um fator de retardamento maior que a unidade. Portanto, quanto maior o fator de retardamento, maior a interação soluto-solo. Como a fase sólida do solo interage com os íons em solução (adsorção), eles têm seu transporte retardado em relação à água. van Genuchten e Wierenga (1986) consideraram esse fator de retardamento (R) igual ao número de volume de poros, para $C/C_0 = 0,5$.

Valores mais elevados dos coeficientes de dispersão estão relacionados às menores inclinações das curvas de efluente e, consequentemente, ao alargamento da faixa de mistura entre as soluções deslocadora e deslocada no perfil do solo, tornando os acréscimos na concentração relativa baixos em relação aos acréscimos no número de volume de poros (NIELSEN; BIGGAR, 1962).

2.1.6 Breakthrough Curves (BTC)

As Breakthrough Curves (BTC), também conhecidas como curvas de distribuição de efluentes, são amplamente utilizadas para caracterização dos processos físico-químicos

envolvidos no transporte de solutos em meios porosos. Estas características técnicas fundamentais são normalmente obtidas utilizando-se colunas de solo deformado ou indeformado em experimentos em laboratório, sendo menos frequentemente sua determinação in situ no campo. Mesmo que isso seja discutível, os parâmetros obtidos a partir de características técnicas fundamentais da coluna são também aplicados em situações de campo.

A razão para isso é a rentabilidade e eficiência dos experimentos de coluna, muito maiores que estudos comparáveis de campo. Além disso, a análise das características técnicas fundamentais da coluna pode fornecer estimativas úteis dos parâmetros para os processos físico-químicos envolvidos no transporte de solutos na subsuperfície do solo. Os parâmetros de transporte de solutos são essenciais para o desenvolvimento e validação de modelos teóricos de transporte de solutos (WANG, 2002).

O método do fluxo em coluna, ou deslocamento miscível, é um dos protocolos experimentais mais utilizados em estudos de adsorção. Experimentos com deslocamento miscível podem ser realizados em amostras indeformadas de solo ou em amostras deformadas. Este tipo de experimento combina efeitos químicos de adsorção com os efeitos hidrológicos do fluxo de solução através dos poros, para estimar o grau de retardamento do contaminante em relação à velocidade de percolação da solução. É mais realista em simular as condições de campo, por levar em consideração, além dos efeitos químicos, os efeitos físicos na retenção do soluto de interesse, como, por exemplo, a difusão do soluto para o interior dos microagregados ou da matéria orgânica do solo (SOARES; CASAGRANDE, 2009).

Segundo estes autores experimentos com colunas têm sido propostos como método alternativo aos experimentos tipo batch, sobre os quais apresentam algumas vantagens: (i) a medida experimental pode ser automatizada e obtida diretamente; (ii) boa exatidão em baixos níveis de adsorção; (iii) a agregação do solo, a relação solo: solução e o fluxo de solução são similares àqueles encontrados sob condições naturais de campo, o que permite simulação mais realista das condições físicas e dos processos químicos, já que a quantidade de íons adsorvida é relacionada principalmente com a concentração do soluto e com a taxa de fluxo da solução e; (iv) as operações de agitação, centrifugação e de filtração não são necessárias.

2.2 Material e métodos

O experimento foi conduzido no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” -

ESALQ/USP, situada no município de Piracicaba – SP (22° 43’ 33” de latitude sul e 47° 38’ 00” de longitude oeste, com 511 m de altitude), e foi conduzido em três etapas: 1) familiarização quanto à utilização do modelo STANMOD; 2) obtenção dos valores dos parâmetros de transporte, mediante a elaboração de Breakthrough Curves (BTC’s) para o nitrato (concentração de 50 g m^{-3}) e 3) avaliação dos valores obtidos dos parâmetros de transporte, em relação às três fontes de aplicação de nitrato, buscando relacionar-se com a influência dos íons acompanhantes com o deslocamento do nitrato no solo.

2.2.1 Etapa 1 - Algumas considerações sobre o modelo STANMOD

Para que os modelos possam determinar com precisão o movimento de solutos no solo, é necessária a determinação de alguns parâmetros de transporte relativos a cada tipo de solo, tais como: coeficiente de dispersão (D), dispersividade (λ) e fator de retardamento (R). Portanto, para o ajuste numérico das curvas de distribuição de efluentes (BTC), e posterior obtenção dos transporte do nitrato, utilizou-se o pacote computacional STANMOD (versão 2.2.) (ŠIMŮNEK et al., 1999). Trata-se de um pacote computacional o qual possui vários códigos inseridos, dentre eles o código CFITIM (code analysing nonequilibrium transport parametrs from miscible displacement experiments) de van Genuchten (1981), que pode ser utilizado para a análise de coluna dados observados de efluentes, utilizando soluções analíticas para uma dimensão de equilíbrio e de não equilíbrio do transporte convectivo-dispersivo. O código inclui soluções analíticas para colunas semi-infinitas. Os modelos de não equilíbrio são baseados no pressuposto de que, seja por razões físicas ou químicas, a adsorção não procede a uma taxa igual em todas as partes do meio de solo. O modelo fornece um meio fácil de usar, eficiente e preciso de ajuste de parâmetros de transporte para diversos dados observados em colunas de efluentes, possibilitando trabalhar de duas formas: 1) estimativa de parâmetros de transporte de solutos por meio de concentrações obtidas em laboratório (chamado de problema inverso) ou 2) predizer concentrações de solutos em condições de escoamento permanente (chamado de problema direto), utilizando para tal as equações de convecção-dispersão, conforme descritas anteriormente.

A distribuição da concentração dos solutos em uma coluna de solo com uma concentração inicial uniforme, em equilíbrio dinâmico, a qual será substituída em um tempo $t = 0$ por uma solução de concentração constante, está apta para ser submetida a uma solução analítica. As condições iniciais e de contorno são dadas pelas equações (13), (14) e (15).

$$c(z,0) = c_i \tag{13}$$

$$c(0,t) = c_0 \tag{14}$$

$$\frac{\partial c}{\partial z}(\infty,t) = 0 \tag{15}$$

A solução para a equação de convecção-dispersão sujeita a esses valores iniciais e de condições de contorno pode ser obtida pela equação 16 (NIELSEN; BIGGAR, 1963; van GENUCHTEN; WIERENGA, 1986):

$$\frac{c(z,t)-c_i}{c_0-c_i} = \frac{1}{2}\ erfc\ \left(\frac{R.z-v.t}{\sqrt{4.D.R.t}}\right) + \frac{1}{2}\ e^{\frac{v.z}{D}} erfc\left(\frac{R.z+v.t}{\sqrt{4.D.R.t}}\right) \tag{16}$$

em que:

$erfc\ (u)$ – função erro complementar

Valores tabulados de $erf(u)$ podem ser encontrados em tabelas; recentes versões de planilhas eletrônicas incluem a rotina para cálculo de $erf(u)$.

$$erf = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^z e^{-t^2}\,dt = 1 - erf \tag{17}$$

Para valores negativos do argumento (u) utiliza-se a identidade:

$$u > 0\ \rightarrow 1 - \mathrm{erf}(u) \tag{18}$$

$$u < 0\ \rightarrow 1 + \mathrm{erf}(u) \tag{19}$$

Uma solução simples, comumente utilizada em experimentos de deslocamento miscível, é obtida retendo somente o primeiro termo do lado direito da equação (16).

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} erfc\ \left(\frac{R.z-v.t}{\sqrt{4.D.R.t}}\right) \tag{20}$$

Nos sistemas dinâmicos, principalmente naqueles em que o meio poroso é saturado, o efeito da difusão sobre a concentração de soluto na solução do solo (entre agregados) é relevante, somente quando a velocidade de escoamento é baixa, ou seja, quando tanto a proporção de macroporos quanto o gradiente hidráulico são baixos. Isso ocorre por que a taxa de transferência de solutos intra-agregados ocorre por difusão, o que a torna insignificante, comparativamente ao transporte por convecção em condições de velocidades de escoamento mais altas, como é frequente em trabalhos de laboratório (RUIZ et al., 2010). Logo, a solução apresentada anteriormente pode ser obtida desprezando a difusão molecular e não se considerando um sistema infinito.

Os parâmetros de transporte R e P são baseados na otimização dos dados, mediante a minimização da soma dos quadrados dos desvios, medidos na equação anterior.

2.2.2 Etapa 2 - Obtenção dos parâmetros de transporte em laboratório por análise de BTC em amostras deformadas e indeformadas

Amostras deformadas

Os materiais de solo foram coletados no município de Piracicaba, SP, sendo provenientes de dois tipos de solos distintos: Latossolo Vermelho Amarelo, série “Sertãozinho” (S1), e Nitossolo Vermelho (S2). As coletas foram realizadas a uma profundidade de 0,20 a 0,50 m.

Depois de coletados os dois tipos de solo, o material de cada um foi seco e destorroado e em seguida peneirado através de uma malha de 0,002 m para se obter a TFSA (terra fina seca ao ar). Em seguida, foram submetidos às análises granulométricas. As amostras dos dois solos foram coletadas para análise física e química, a fim de se prover informações sobre as condições iniciais dos solos.

Pela Tabela 1 podem ser verificadas as características físicas dos solos estudados. Cabe ressaltar que o conhecimento das características físicas dos solos é necessário para um melhor entendimento do movimento da água, e consequentemente, dos solutos. Em termos de classificação, pode-se dizer que o S1 é classificado como sendo de textura média e o S2 de textura argilosa, segundo a classificação da EMBRAPA (2006). Observa-se, também, que o S1 possui quantidade de areia superior ao S2, enquanto o S2 possui uma quantidade de silte relativamente elevada.

Tabela 1 - Caracterização física dos solos estudados: Latossolo Vermelho Amarelo (S1) e Nitossolo Vermelho (S2)

Características	S1	S2
Granulometria (g kg^{-1})		
Argila (< 0,002 mm)	198	402
Silte (0,053 – 0,002 mm)	32	138
Areia total	770	460
Areia grossa (2,00 – 0,210 mm)	320	210
Areia fina (0,210 – 0,053 mm)	540	250
Classe Textural*	Média	Argilosa
Densidade do solo (kg dm^{-3})	1,23	1,23
Densidade de partículas (kg dm^{-3})	2,60	2,73
Porosidade (dm^3 dm^{-3})	52,69	54,94

* Classificação segundo EMBRAPA (2006)

Pela Tabela 2 pode ser verificada a análise de micronutrientes. Ambos os solos apresentam níveis muito altos de cobre e ferro; já para o zinco, o S1 apresentou nível médio e o S2 muito alto; para o manganês, o S1 apresentou nível baixo e o S2 muito alto; para o boro, o S1 encontra-se com nível baixo e o S2 como nível médio.

Tabela 2 - Análise de micronutrientes dos solos estudados: Latossolo Vermelho Amarelo (S1) e Nitossolo Vermelho (S2)

Nutriente (mg dm^{-3})	S1	S2
Cu (DTPA)	1,6	3,9
Fe (DTPA)	26	28
Zn (DTPA)	0,9	3,6
Mn (água quente)	1,7	28,4
B (água quente)	0,32	0,41

Pela caracterização química dos solos (Tabela 3), pode-se observar que ambos os solos apresentaram pH superior a 6,0, sendo considerado por Raij et al. (1996), como muito alto. Os mesmos autores, consideram o nível de fósforo entre 0 a 7 mg dm^{-3} como muito baixo, estando o nível de ambos os solos nessa faixa, já os níveis de potássio entre 1,6 e 2,3 mmolc dm^{-3} enquadram-se como médio e entre 2,4 e 3,0 mmolc dm^{-3} como alto; assim, o solo arenoso encontra-se com o nível de potássio médio e o solo argiloso como nível alto. O mesmo ocorre para o nível de cálcio, já que se considera médio o nível de cálcio entre 16 e 25 mmolc dm^{-3} e alto entre 26 e 40 mmolc dm^{-3}. O nível de magnésio encontra-se como médio

para o solo S1e muito alto para o solo S2. A saturação de bases encontra-se nos níveis alto e muito alto, respectivamente para os solos arenoso e argiloso.

Tabela 3 - Caracterização química dos solos estudados: Latossolo Vermelho Amarelo (S1) e Nitossolo Vermelho (S2)

Parâmetros	S1	S2
pH ($CaCl_2$)	6,2	6,2
M.O. (g dm^{-3})	13	27
P (mg dm^{-3})	3	3
K ($mmol_c$ dm^{-3})	2,0	2,8
Ca ($mmol_c$ dm^{-3})	22	34
Mg ($mmol_c$ dm^{-3})	10	23
H+Al ($mmol_c$ dm^{-3})	15	18
Al ($mmol_c$ dm^{-3})	0	0
Soma de bases ($mmol_c$ dm^{-3})	34	60
CTC ($mmol_c$ dm^{-3})	49	78
Saturação de bases (V%)	69	77
Saturação de Al (m%)	0	0
S (mg dm^{-3})	14	15

Pela Tabela 4 podem ser verificados os resultados da análise do ataque sulfúrico dos solos, que tem como objetivo a determinação dos teores de silício, ferro e alumínio. Também podem ser verificados os índices K_i e K_r, para ambos os solos; tais relações são determinadas por cálculos com base nos resultados do ataque sulfúrico. O K_i é considerado um índice de intemperização; representa o quociente da divisão entre um elemento de grande mobilidade por um de muita baixa mobilidade no processo de intemperismo. Logo, os menores valores são indicativos de grande intemperização. Os valores de K_r, por sua vez, representam o quociente da divisão entre um elemento de grande mobilidade (Si) e o somatório de elementos de baixa mobilidade (Fe e Al); e assim, como o K_i, é indicativo do grau de intemperismo dos solos.

Tabela 4 - Análise do ataque sulfúrico dos solos estudados: Latossolo Vermelho Amarelo (S1) e Nitossolo Vermelho (S2)

Parâmetros (%)	S1	S2
Fe_2O_3	11,58	32,18
Al_2O_3	4,00	10,40
SiO_2	7,30	13,70
Índices	S1	S2
K_i	3,10	2,24
K_r	1,09	0,75

O preenchimento das colunas deformadas com os solos foi executado de forma a proporcionar uniformidade e homogeneidade em toda coluna, sendo que o solo foi previamente mensurado, utilizando aproximadamente a mesma massa para as colunas. Em seguida, adicionou-se o solo em camadas e cada camada sobreposta era compactada por leve pressão com um disco de madeira de diâmetro inferior ao diâmetro interno da coluna.

As colunas utilizadas possuíam em sua parte inferior um círculo de manta sintética sobre uma tela fixada por um "cap" com rosca. Para a manutenção de uma carga hidráulica constante de 0,1 m, foi instalado, na parte superior da coluna, um dreno para que o excesso de água pudesse ser retirado, pois a aplicação da solução era superior ao fluxo de água no solo. Assim, não houvesse risco da coluna permanecer na ausência da carga hidráulica. A coluna de solo apresentava as seguintes dimensões: 0,205 m de altura e 0,05 m de diâmetro.

Amostras indeformadas

Na coleta das amostras indeformadas foi utilizado o trado tipo Josefina, fabricado pela empresa SONDATERRA®, sendo confeccionado inteiramente de aço inoxidável. Esse amostrador é adequado para a coleta de material de solos dentro de tubos de PVC, os quais eram inseridos no interior do trado e tinham a sua altura ajustada. Foram utilizados tubos de PVC comercial de esgoto de 0,05 m de diâmetro externo e 0,45 m de altura. Após as amostras serem coletadas, estas foram devidamente embaladas para evitar qualquer perturbação em sua estrutura e cortadas para que ficassem com altura de 0,23 m, descartando-se as partes superiores e inferiores. Em seguida, as colunas foram novamente embaladas e transportadas para o Laboratório de Física do Solo e Qualidade de Água do Departamento de Engenharia de Biossistemas. Foram realizados furos na parte superior das colunas de PVC para a confecção dos drenos, localizados a 0,10 m acima da amostra indeformada de solo, e colocação do "cap" externo de encaixe, adaptado com furo para colocação de tela metálica. Após isso, as mesmas

foram armazenadas para posterior utilização. A Figura 1 mostra os detalhes da coleta das amostras indeformadas das colunas de solos.

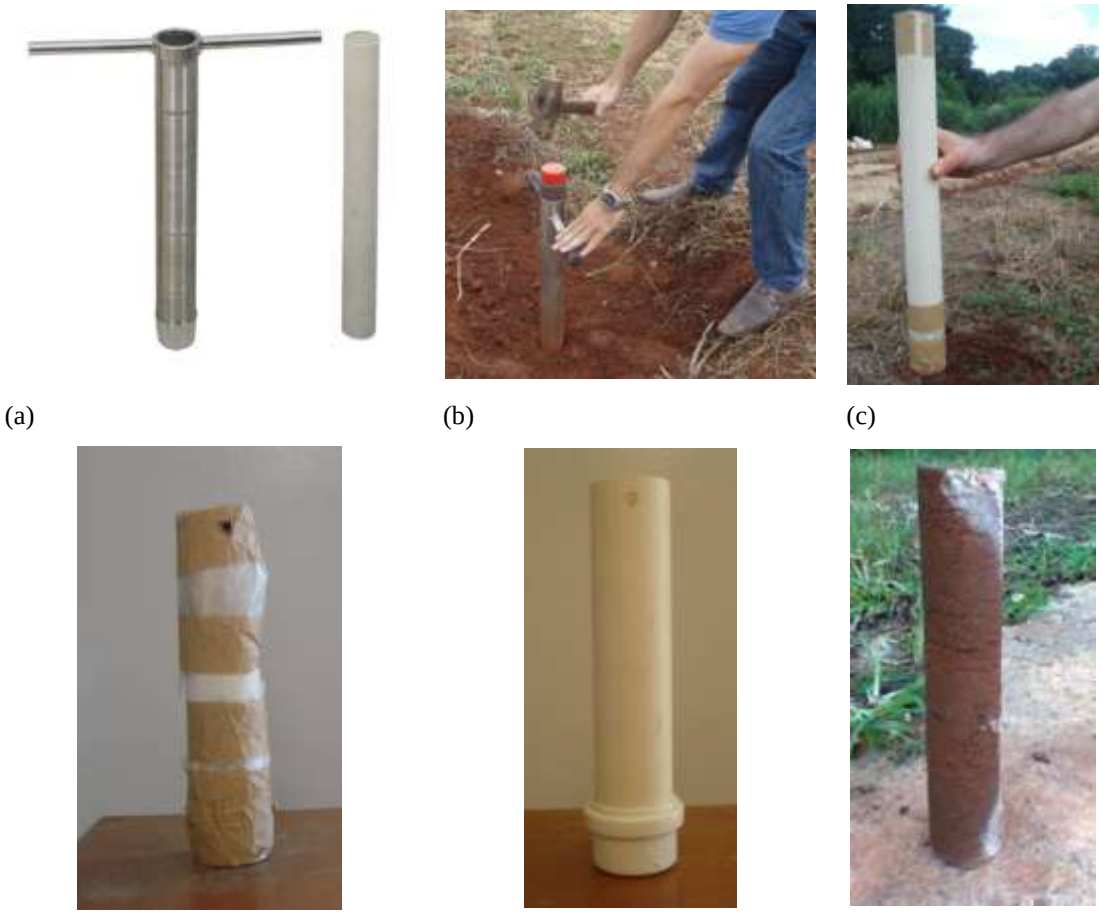


Figura 1 - Detalhes da coleta das amostras indeformadas das colunas de solos (a) Trado Josefina, utilizado nas coletas das amostras indeformadas; (b) coleta de amostra indeformada; (c) tubo de PVC com a amostra de solo indeformado em seu interior; (d) amostra após o corte e furo para o dreno; (e) coluna PVC com amostra de solo indeformada em seu interior, detalhe do dreno na parte inferior e do "cap" externo de encaixe na parte inferior; (f) detalhe da amostra de solo indeformada após o corte do tubo de PVC

Elaboração das Breakthrough Curves (BTC)

Para a obtenção dos parâmetros de transporte de solutos no solo foram feitas, em laboratório, as Breakthrough Curves.

Para o início do teste, saturou-se a coluna com água destilada de maneira lenta, por capilaridade, objetivando-se expulsar o ar contido nos microporos. A coluna foi colocada em um balde, e em seguida adicionou-se água destilada por gotejamento, junto às paredes do balde, até atingir cerca de 2/3 da altura da coluna de solo. Depois disso, o conjunto

permaneceu em repouso por 24 horas para a completa saturação. Após 24 horas de repouso (saturação), iniciou-se o processo de “lavagem” do solo o qual consiste na passagem de água destilada através da coluna durante um período de no mínimo de 24 horas para que todos os íons presentes na solução do solo fossem removidos pela água percolante.

Após a lavagem, verificou-se, em cada unidade experimental, se o fluxo estava em condição de regime permanente. Comprovada a condição de fluxo constante, deu-se início à passagem das soluções (pelas colunas de solo), contendo diferentes fontes de nitrato (nitrato de amônio (NH_4NO_3), nitrato de cálcio ($Ca(NO_3)_2$) e nitrato de potássio (KNO_3), todas com a concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^- (Figura 2), sendo utilizado um frasco de Mariotte para que a vazão de aplicação da solução de nitrato se mantivesse constante. As soluções de nitrato foram preparadas diluindo 81,53 mg de KNO_3, 64,55 mg de NH_4NO_3 e 95,21 mg de $Ca(NO_3)_2$ para cada litro de solução, obtendo assim 50 g m^{-3} de NO_3^- em cada solução.

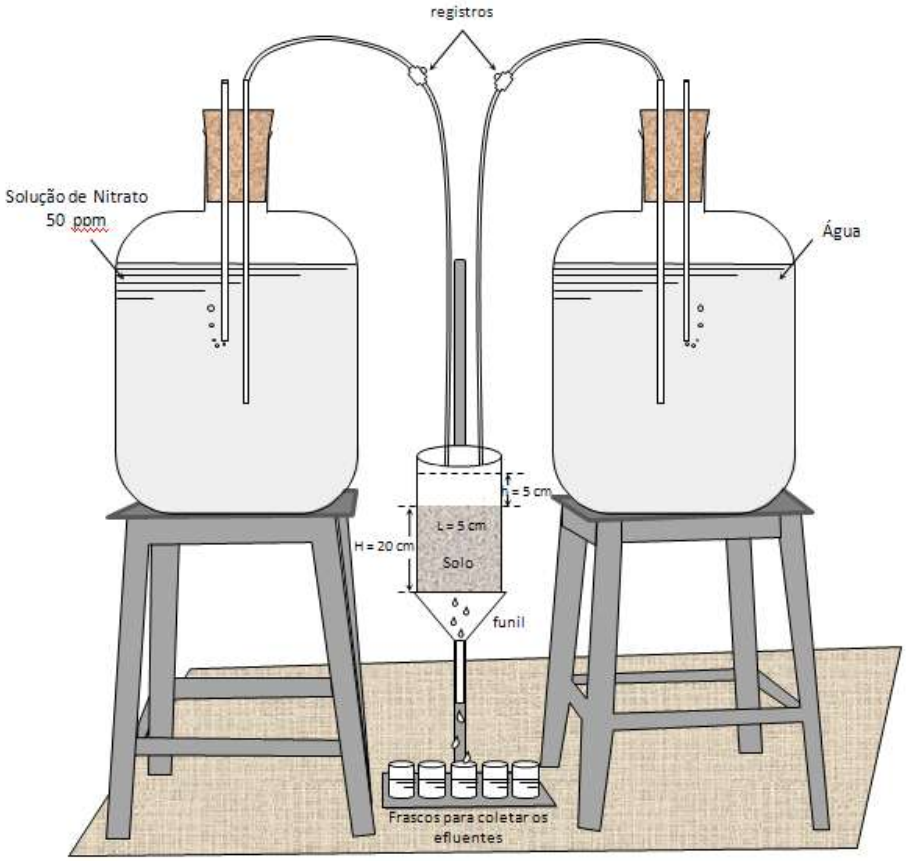


Figura 2 - Esquema montado em laboratório para elaboração das Breakthrough Curves, visando a obtenção dos parâmetros de transporte de solutos: fator de retardamento (R), número de Peclet (P), coeficiente de dispersão (***D***) e dispersividade (λ)

A partir desse instante, os efluentes foram coletados sequencialmente em frascos de acrílico, com numeração sequenciada, contendo um volume de 15 mL por frasco; estes valores de volumes de poros foram calculados em função do volume da coluna e da porosidade do solo (21).

$$VP = \alpha . V \tag{21}$$

em que:

VP – volume de poros (L^3);

α – porosidade do solo em questão ($L^3\ L^{-3}$);

V – volume da coluna (L^3)

Após a coleta dos efluentes, a concentração de NO_3^- em cada frasco foi determinada pelo método de determinação do espectrofotômetro (YANG et al, 1998).

De posse dos valores de concentração de nitrato e dos dados experimentais de cada coluna de solo foram elaboradas as curvas de eluição de nitrato, para cada solo e soluto utilizados. Utilizou-se o software STANMOD (versão 2.2.) (ŠIMŮNEK, 1999), usando-se o problema inverso e o código CFITIM, que tem como dados de entrada a concentração relativa (C/C_0) do soluto e o volume da solução dividido pelo volume de poros da coluna (VP); foram obtidos os parâmetros de transporte do nitrato em cada situação, mediante o ajuste dos dados obtidos em laboratório. Os parâmetros de transporte determinados pelo software correspondem ao fator de retardamento (R) e número de Peclet (P), a partir destes foram determinados os parâmetros coeficiente de dispersão (D) e dispersividade (λ). A velocidade da água no solo foi determinada medindo-se o tempo de coleta das amostras e o volume de efluente coletado. O conhecimento desses parâmetros de transporte de solutos relativos a cada tipo de solo é de extrema importância para a aplicação dos modelos de simulação do movimento de solutos no solo.

2.2.3 Etapa 3 - Análise dos resultados pela interpretação dos valores dos parâmetros de transporte nas amostras deformadas e indeformadas

Após o ajuste numérico das BTC's pelo modelo STANMOD, o qual atua de forma a encontrar os parâmetros de transporte mediante a redução do erro entre os valores observados e simulados (tanto para as amostras deformadas quanto para as indeformadas), diante da solução de 50 g m^{-3} de nitrato ((nitrato de amônio (NH_4NO_3), nitrato de cálcio ($Ca(NO_3)_2$) e

nitrato de potássio (KNO_3), para os dois solos, buscou-se analisar os valores obtidos dos parâmetros de transporte, bem como interpretá-los, em termos da inclinação das curvas BTC's ("slope"), de forma que permitisse um enriquecimento da discussão dos resultados obtidos, no sentido de avaliar o efeito adsortivo do solo, bem como, do íon acompanhante.

Para as análises dos parâmetros de transporte do nitrato foi utilizada a linguagem e o ambiente R, versão 2.15.1. (R. DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012. Os dados foram analisados por meio das medidas de posição (média e mediana), dispersão (valores máximos, mínimos, desvio padrão, variância e coeficiente de variação) e forma da dispersão (coeficientes de assimetria e curtose). A normalidade foi testada pelo teste Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) e, para o caso dos dados que não foram normais, foram transformados por Box-Cox.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Amostras de solos deformadas para nitrato de cálcio

Na Figura 3 estão representadas as curvas de distribuição de efluente do nitrato de cálcio para as BTC's do S1 e S2 de amostras deformadas.

O ajuste do modelo aos dados experimentais, assim como a estimativa dos parâmetros de transporte do nitrato para cada soluto aplicado, foram realizados para cada coluna de solo, pois segundo Álvarez-Benedí et al. (1999), a estimativa dos parâmetros de transporte é realizado pelo ajuste do modelo aos resultados experimentais sob condições específicas de fluxo; assim, realizou-se o ajuste para cada BTC separadamente.

O formato e desenvolvimento das curvas de eluição caracteriza o deslocamento miscível da solução; logo, indica a existência ou não de interação entre o solo e o soluto aplicado. Observa-se a elevada inclinação das curvas de distribuição de NO_3^- das amostras deformadas do S2 em relação às amostras deformadas do S1; pode-se verificar também o deslocamento das curvas para esquerda, indicando menor interação entre o S2 e o nitrato.

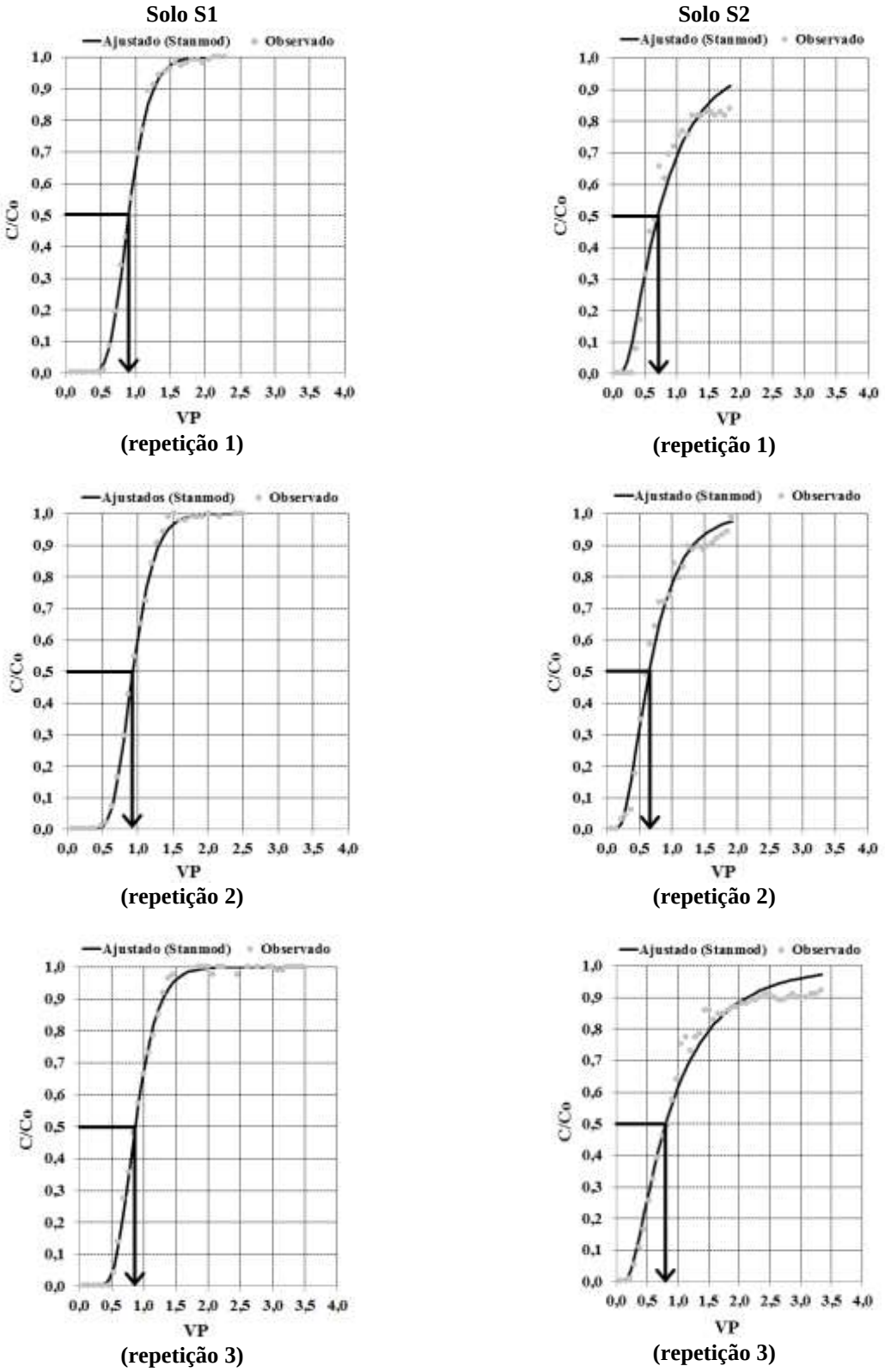


Figura 3 - Curvas de distribuição de nitrato para a fonte de nitrato $Ca(NO_3)_2$, observadas e ajustadas pelo modelo STANMOD, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^-, das amostras de solo deformadas para os solos S1 e S2 (em que C/C_0 é a concentração relativa e VP é o volume da solução dividido pelo volume de poros da coluna)

As setas nas curvas marcam o volume aplicado pelo volume da solução (VP) em que a concentração relativa (C/C_0) foi igual a 0,5, pois segundo Nielsen e Biggar (1962), o VP correspondente à concentração relativa de 0,5 é um primeiro indício, no sentido da existência ou não, de interações soluto-solo. Assim, como mostram as setas nas curvas, os valores de VP para C/C_0 = 0,5 foram inferiores a 1. van Genuchten e Wierenga (1986) consideraram o fator de retardamento (R) igual ao número de volume de poros, para C/C_0 = 0,5; desta forma pode-se relacionar se o ajuste do modelo foi satisfatório pela comparação do gráfico com os valores do parâmetro R estimado pelo modelo.

Diante das repetições 1, 2 e 3, sob a aplicação de nitrato de cálcio nas BTC's do S1, verificou-se que foi necessário a aplicação de um menor volume de solução, em torno de 1,5 VP, em relação às repetições 1, 2 e 3 das BTC's do S2; neste solo foram necessários cerca de 2,0 VP para que a concentração do efluente coletado atingisse a concentração aplicada. Tal fato está relacionado à maior velocidade da solução no S1, que como pode ser observado na Tabela 5, foi superior a velocidade da solução no S2. Entretanto, pela Figura 3, verifica-se que nas curvas das BTC's do S2 o início da ascensão das curvas, por volta de 0,25 VP, é anterior a ascensão das curvas do S1, em que a ascensão ocorre após 0,5 VP.

Os parâmetros de transporte do nitrato nas amostras deformadas de S1 e S2 para $Ca(NO_3)_2$ e as características das colunas estão apresentados na Tabela 5, quais sejam a velocidade da solução no solo (v), o número de Peclet (P), o fator de retardamento (R), a dispersividade (λ), o coeficiente de dispersão (D), o fluxo da solução no solo (q), a densidade do solo (ρ) e a porosidade (α) do solo nas colunas. Os parâmetros P e R encontram-se no intervalo de confiança de 95%, e estão apresentados com seus respectivos desvios padrões. Verifica-se um ajuste satisfatório a dos dados observados à estimativa dos parâmetros.

Tabela 5 - Parâmetros de transporte de nitrato nas amostras deformadas de S1 e S2, para o soluto $Ca(NO_3)_2$, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^-

Solo	BTC	P Média ± DP*	R Média ± DP*	v (cm min^{-1})	λ (cm)	D (cm^2 min^{-1})	q (cm min^{-1})	ρ (kg dm^{-3})	α (m^3 m^{-3})
	1	28,40 ± 1,96	0,93 ± 0,01	0,60	0,72	0,43	0,28	1,37	0,4721
S1	2	28,87 ± 2,83	0,96 ± 0,01	0,62	0,71	0,44	0,29	1,39	0,4647
	3	19,92 ± 1,56	0,91 ± 0,01	0,68	1,03	0,70	0,33	1,34	0,4836
	1	3,44 ± 1,11	0,90 ± 0,07	0,14	5,96	0,81	0,07	1,34	0,5074
S2	2	5,81 ± 1,32	0,75 ± 0,03	0,12	3,53	0,42	0,06	1,35	0,5042
	3	2,98 ± 0,57	1,06 ± 0,05	0,13	6,88	0,89	0,06	1,39	0,4916

* DP é o desvio padrão do software STANMOD na estimativa dos parâmetros

Os valores de fluxo da solução no S1 foram inferiores na repetição 1 e no S2 na repetição 2 (Tabela 5) diante as demais colunas; estes resultados podem ser creditados ao processo de preenchimento das colunas.

Na Tabela 6 encontram-se as análises de estatística descritiva dos parâmetros de transporte do nitrato nas amostras deformadas de S1 e S2 para o soluto $Ca(NO_3)_2$. Os resultados obtidos pela análise estatística descritiva mostram que os parâmetros apresentaram valores de tendência central (média e mediana) bem próximos, podendo-se verificar valores de assimetria próximos de zero, levando a uma distribuição normal, o que também confirmado pelo teste de Shapiro–Wilk em nível de 5% de probabilidade.

Tabela 6 - Estatística descritiva dos parâmetros de transporte de NO_3^- nas amostras deformadas de S1 e S2 para $Ca(NO_3)_2$

Fator	Mín.	Máx.	Média	Mediana	DP	CV (%)	Var.	Cs	Ck	W
					S1					
α	0,46	0,48	0,47	0,47	0,01	0,02	0,00	0,14	-2,33	ns
D	0,43	0,70	0,52	0,44	0,15	0,29	0,02	0,38	-2,33	ns
ρ	1,34	1,39	1,37	1,37	0,03	0,02	0,00	-0,13	-2,33	ns
λ	0,71	1,03	0,82	0,72	0,18	0,22	0,03	0,38	-2,33	ns
P	19,92	28,87	25,73	28,40	5,04	0,20	25,37	-0,38	-2,33	ns
q	0,28	0,33	0,30	0,29	0,03	0,09	0,00	0,32	-2,33	ns
R	0,91	0,96	0,93	0,93	0,03	0,03	0,00	0,13	-2,33	ns
v	0,60	0,68	0,63	0,62	0,04	0,07	0,00	0,29	-2,33	ns
					S2					
α	0,49	0,50	0,50	0,51	0,01	0,02	0,00	-0,32	-2,33	ns
D	0,42	0,71	0,81	0,89	0,25	0,36	0,06	-0,34	-2,33	ns
ρ	1,34	1,36	1,35	1,39	0,03	0,02	0,00	0,32	-2,33	ns
λ	3,53	5,46	5,96	6,88	1,73	0,32	3,00	-0,27	-2,33	ns
P	2,98	4,08	3,44	5,81	1,52	0,37	2,31	0,35	-2,33	ns
q	0,06	0,06	0,06	0,07	0,01	0,09	0,00	0,38	-2,33	ns
R	0,75	0,90	0,90	1,06	0,16	0,17	0,02	0,02	-2,33	ns
v	0,12	0,13	0,13	0,14	0,01	0,08	0,00	0,00	-2,33	ns

Mín. = mínimo; Máx. = máximo; DP = desvio padrão; CV (%) = coeficiente de variação; Var. = Variância; Cs = assimetria; Ck = curtose; e ns distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk (W) a 5% de probabilidade.

2.3.2 Amostras de solos deformadas para nitrato de amônio

Na Figura 4 estão representadas as curvas de distribuição de efluente do nitrato de amônio para as BTC's de S1 e S2 das amostras deformadas. Nas BTC's do S1, diante a aplicação de nitrato de amônio, repetições 1, 2 e 3, verifica-se que foi necessário a aplicação de um menor volume de solução, em torno de 1,5 VP, em relação às repetições 1, 2 e 3 das BTC's do S2 em que foram necessários cerca de 2,0 VP para que a concentração do efluente coletado atingisse a concentração aplicada.

Observa-se, pela Figura 4, elevada inclinação das curvas das amostras de S2 deformadas em relação às amostras de S1, e que as curvas nas amostras de S2 estão mais deslocadas para esquerda. Também se verifica que o início da ascensão das curvas do S2 foi anterior à ascensão das curvas do S1, indicando, assim, maior mobilidade do nitrato no S2.

Na Tabela 7 podem ser observados os parâmetros de transporte do nitrato nas amostras deformadas de S1 e S2 para NH_4NO_3. Verifica-se um ajuste satisfatório do modelo aos dados observados e na estimativa dos parâmetros.

Tabela 7 - Parâmetros de transporte de nitrato nas amostras deformadas de S1 e S2, para o soluto NH_4NO_3, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^-

Solo	BTC	P Média ± DP*	R Média ± DP*	v (cm min^{-1})	λ (cm)	D (cm^2 min^{-1})	q (cm min^{-1})	ρ (kg dm^{-3})	α (m^3 m^{-3})
	1	21,98 ± 2,70	0,96 ± 0,01	0,76	0,93	0,71	0,37	1,33	0,4973
S1	2	22,22 ± 2,40	0,97 ± 0,01	0,66	0,92	0,61	0,31	1,36	0,4847
	3	17,13 ± 1,81	0,91 ± 0,01	0,64	1,20	0,77	0,31	1,35	0,4908
	1	9,25 ± 1,20	0,80 ± 0,02	0,16	2,22	0,35	0,08	1,37	0,4834
S2	2	4,14 ± 0,52	0,98 ± 0,03	0,42	4,95	2,06	0,21	1,34	0,4957
	3	12,22 ± 0,92	0,81 ± 0,01	0,15	1,68	0,26	0,08	1,37	0,4841

* DP é o desvio padrão do software STANMOD na estimativa dos parâmetros

Os valores de fluxo da solução observados no S1 foram superiores na repetição 1 e no S2 na repetição 2 (Tabela 7), diante as demais colunas; estes resultados podem ser creditados ao processo de preenchimento das colunas.

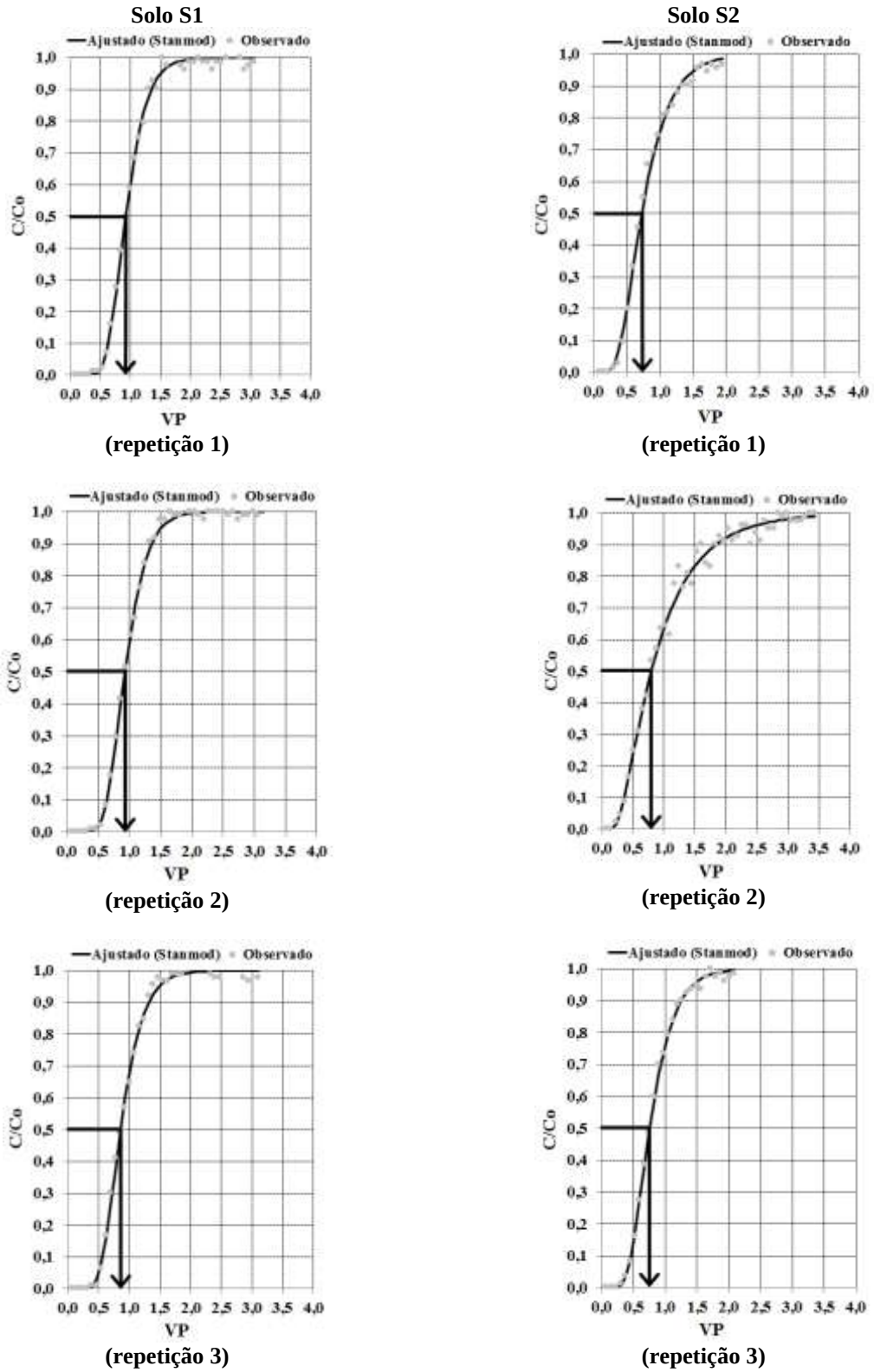


Figura 4 - Curvas de distribuição de nitrato para a fonte de nitrato NH_4NO_3, observadas e ajustadas pelo modelo STANMOD, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^-, das amostras de solo deformadas para os solos S1 e S2 (em que C/C_0 é a concentração relativa e VP é o volume da solução dividido pelo volume de poros da coluna)

Na Tabela 8 encontram-se as análises de estatística descritiva dos parâmetros de transporte do nitrato nas amostras deformadas de S1 e S2, para o soluto NH_4NO_3. Os resultados obtidos pela análise estatística descritiva revelam que os parâmetros apresentaram valores de tendência central (média e mediana) bem próximos, apresentando valores de assimetria próximos de zero, levando a uma distribuição normal, sendo também confirmado pelo teste de Shapiro–Wilk a 5% de probabilidade.

Tabela 8 - Estatística descritiva dos parâmetros de transporte de NO_3^- nas amostras deformadas de S1 e S2 para NH_4NO_3

Fator	Mín.	Máx.	Média	Mediana	DP	CV (%)	Var.	Cs	Ck	W
					S1					
α	0,48	0,50	0,49	0,49	0,01	0,01	0,00	0,02	-2,33	ns
D	0,61	0,77	0,70	0,71	0,08	0,12	0,01	-0,16	-2,33	ns
ρ	1,33	1,36	1,35	1,35	0,02	0,01	0,00	-0,21	-2,33	ns
λ	0,92	1,20	1,02	0,93	0,16	0,16	0,03	0,38	-2,33	ns
P	17,13	22,22	20,44	21,98	2,87	0,14	8,25	-0,38	-2,33	ns
q	0,31	0,37	0,33	0,31	0,03	0,10	0,00	0,38	-2,33	ns
R	0,48	0,50	0,95	0,96	0,01	0,01	0,00	0,02	-2,33	ns
v	0,61	0,77	0,69	0,66	0,08	0,12	0,01	-0,16	-2,33	ns
					S2					
α	0,48	0,50	0,49	0,48	0,01	0,01	0,00	0,38	-2,33	ns
D	0,26	2,06	0,89	0,35	1,01	1,14	1,03	0,38	-2,33	ns
ρ	1,34	1,37	1,36	1,37	0,02	0,01	0,00	-0,38	-2,33	ns
λ	1,68	4,95	2,95	2,22	1,75	0,59	3,07	0,34	-2,33	ns
P	4,14	12,22	8,54	9,25	4,09	0,48	16,70	-0,17	-2,33	ns
q	0,08	0,21	0,12	0,08	0,08	0,61	0,01	0,38	-2,33	ns
R	0,80	0,98	0,86	0,81	0,10	0,12	0,01	0,38	-2,33	ns
v	0,15	0,42	0,24	0,16	0,15	0,63	0,02	0,38	-2,33	ns

Mín. = mínimo; Máx. = máximo; DP = desvio padrão; CV (%) = coeficiente de variação; Var. = Variância; Cs = assimetria; Ck = curtose; e ns distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk (W) a 5% de probabilidade.

2.3.3 Amostras de solos deformadas para o nitrato de potássio

Na Figura 5 estão representadas as curvas de distribuição do nitrato para o soluto nitrato de potássio para as amostras deformadas, nos solos S1 e S2.

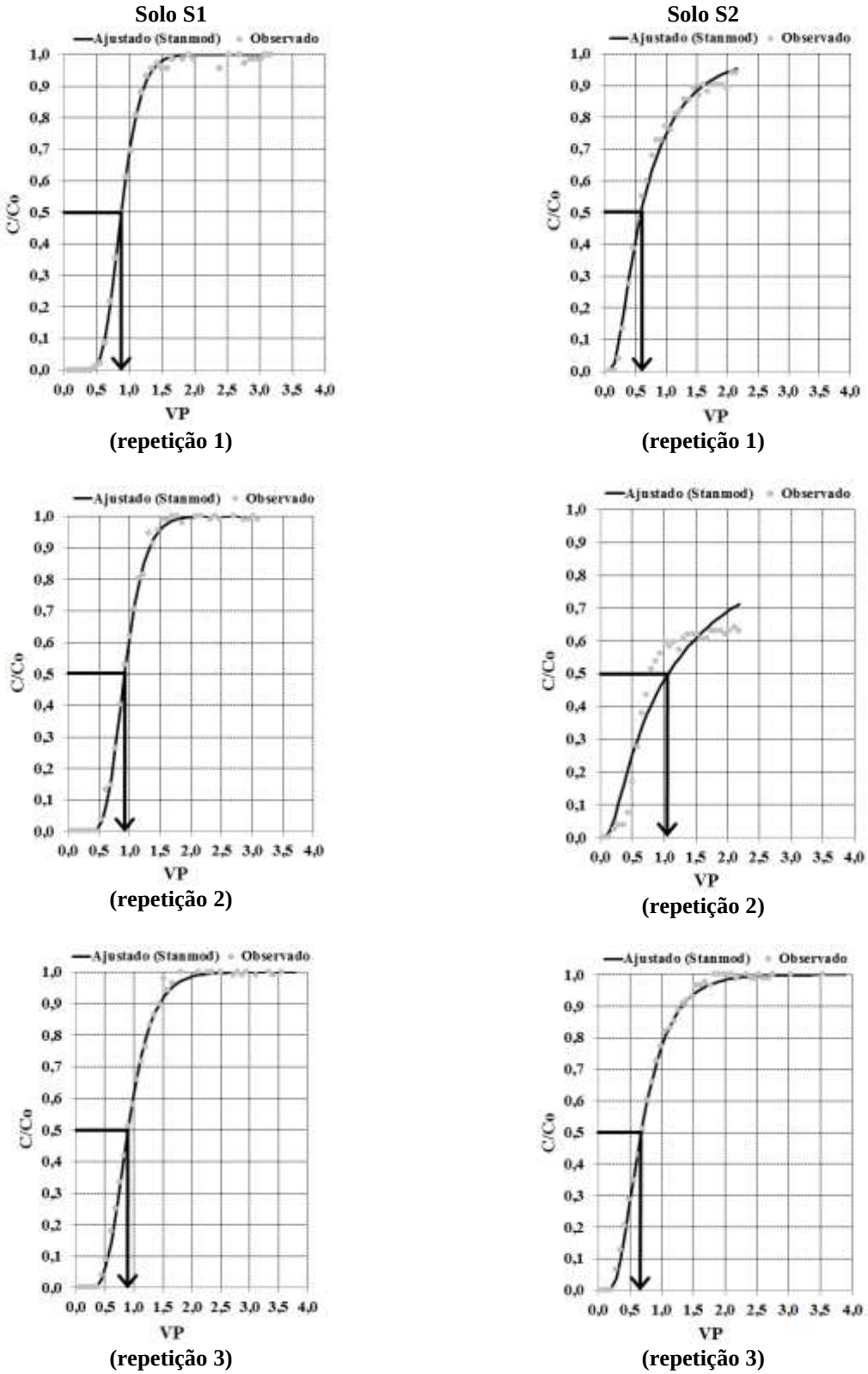


Figura 5 - Curvas de distribuição de nitrato para a fonte de nitrato KNO_3, observadas e ajustadas pelo modelo STANMOD, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^-, das amostras de solo deformadas para os solos S1 e S2 (em que C/C_0 é a concentração relativa e VP é o volume da solução dividido pelo volume de poros da coluna)

Nas repetições 1, 2 e 3 das BTC's do S1, diante a aplicação de nitrato de potássio, verifica-se que foi necessário, em geral, a aplicação de menor volume de solução, em torno de 1,5 VP, em relação às repetições 1, 2 e 3 das BTC's do S2, em que foram necessários mais de 2,0 VP para que a concentração do efluente coletado atingisse a concentração aplicada.

Na Tabela 9 podem ser observados os parâmetros de transporte do nitrato nas amostras deformadas de S1 e S2 para KNO_3. Verifica-se um ajuste satisfatório do modelo aos dados observados e na estimativa dos parâmetros.

Observa-se que na repetição 2 do S2 (Figura 5) o modelo não teve um bom ajuste, pois há um distanciamento entre os dados observados e o ajuste do modelo; também se verifica que a estimativa dos parâmetros P e R (Tabela 9) pelo STANMOD para a repetição 2 do S2 difere das demais BTC para o mesmo solo. Não se sabe ao certo o que ocasionou este fato, entretanto pode ter ocorrido processo de mistura incompleta na coluna, devido à presença de zona de estagnação da solução pela baixa velocidade (v = 0,07 cm min^{-1}).

Tabela 9 - Parâmetros de transporte de nitrato nas amostras deformadas de S1 e S2, para o soluto KNO_3, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^-

Solo	BTC	P Média ± DP*	R Média ± DP*	v (cm min^{-1})	λ (cm)	D (cm^2 min^{-1})	q (cm min^{-1})	ρ (kg dm^{-3})	α (m^3 m^{-3})
S1	1	28,29 ± 2,88	0,91 ± 0,01	0,52	0,72	0,38	0,25	1,38	0,4707
	2	24,02 ± 2,16	0,96 ± 0,01	0,85	0,85	0,72	0,41	1,35	0,4811
	3	13,91 ± 1,64	0,96 ± 0,01	0,68	1,47	1,00	0,33	1,32	0,4911
S2	1	2,78 ± 0,43	0,82 ± 0,03	0,17	7,37	1,27	0,08	1,41	0,4844
	2	0,78 ± 0,51	2,35 ± 0,83	0,07	26,36	1,79	0,03	1,33	0,5114
	3	6,90 ± 0,61	0,77 ± 0,01	0,22	2,97	0,65	0,12	1,29	0,5271

* DP é o desvio padrão do software STANMOD na estimativa dos parâmetros

Os valores de fluxo da solução de nitrato de potássio no S1 repetição e no S2 repetição 3 (Tabela 9) foram inferiores às demais colunas; o que podem ser creditado ao processo de preenchimento das colunas.

Na Tabela 10 encontram-se as análises da estatística descritiva dos parâmetros de transporte do nitrato nas amostras deformadas de S1 e S2 para o soluto KNO_3. Os resultados obtidos pela análise estatística descritiva revelam que os parâmetros apresentaram valores de tendência central (média e mediana) bem próximos, apresentando valores de assimetria próximos de zero, levando a uma distribuição normal, sendo também confirmado pelo teste de Shapiro–Wilk a 5% de probabilidade.

Tabela 10 - Estatística descritiva dos parâmetros de transporte de NO_3^- nas amostras deformadas de S1 e S2 para KNO_3

Fator	Mín.	Máx.	Média	Mediana	DP	CV (%)	Var.	Cs	Ck	W
					S1					
α	0,47	0,49	0,48	0,48	0,01	0,02	0,00	-0,01	-2,33	ns
D	0,38	1,00	0,70	0,72	0,31	0,44	0,10	-0,06	-2,33	ns
ρ	1,32	1,38	1,35	1,35	0,03	0,02	0,00	0,00	-2,33	ns
λ	0,72	1,47	1,01	0,85	0,40	0,40	0,16	0,34	-2,33	ns
P	13,91	28,29	22,07	24,02	7,39	0,33	54,54	-0,25	-2,33	ns
q	0,25	0,41	0,33	0,33	0,08	0,24	0,01	0,00	-2,33	ns
R	0,91	0,96	0,94	0,96	0,03	0,03	0,00	-0,38	-2,33	ns
v	0,52	0,85	0,68	0,68	0,17	0,24	0,03	0,02	-2,33	ns
					S2					
α	0,48	0,53	0,51	0,51	0,02	0,04	0,00	-0,17	-2,33	ns
D	0,65	1,79	1,24	1,27	0,57	0,46	0,33	-0,06	-2,33	ns
ρ	1,29	1,41	1,34	1,33	0,06	0,05	0,00	0,21	-2,33	ns
λ	2,97	26,36	12,23	7,37	12,43	1,02	154,51	0,33	-2,33	ns
P	0,78	6,90	3,49	2,78	3,12	0,90	9,74	0,21	-2,33	ns
q	0,03	0,12	0,08	0,08	0,05	0,59	0,00	-0,07	-2,33	ns
R	0,77	2,35	1,31	0,82	0,90	0,68	0,81	0,38	-2,33	ns
v	0,07	0,22	0,15	0,17	0,08	0,50	0,01	-0,21	-2,33	ns

Mín. = mínimo; Máx. = máximo; DP = desvio padrão; CV (%) = coeficiente de variação; Var. = Variância; Cs = assimetria; Ck = curtose; e ns distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk (W) a 5% de probabilidade.

Em todas as BTC's, de ambos os solos, para o nitrato de amônio, foram atingidas as concentrações aplicadas, fato que não foi observado para as BTC do S2 quando se aplicou $Ca(NO_3)_2$ e KNO_3. Uma possível explicação pode estar relacionada à transformação de NH_4^+ em NO_3^-, na solução de NH_4NO_3, que aumentou a concentração de nitrato na solução.

Assim como para o nitrato de cálcio (Figura 3) e para o nitrato de amônio (Figura 4), observou-se maior inclinação das curvas para as amostras do S2 também para o nitrato de potássio (Figura 5); o mesmo pode ser dito com relação ao deslocamento das curvas para esquerda. Em geral, observou-se menores valores para o fator de retardamento para o S2, em todos os solutos aplicados, quando comparados com os valores de R do S1. Dessa forma é possível afirmar que ocorreu maior mobilidade do nitrato, para as três fontes de NO_3^-, no S2, o qual possui maior teor de argila que o S1 (Tabela 1), estando as maiores perdas de nitrato relacionado à maior presença de cargas negativas. Observa-se que os valores de R foram inferiores ao valor unitário, nos casos em que isso ocorre, segundo van Genuchten e Wierenga

(1986), indicam que apenas uma fração da fase líquida participa no processo de transporte, podendo ser o caso em que a substância química está sujeita a exclusão aniônica ou quando há presença relativa de regiões de água imóvel que não participa do transporte convectivo (WIERENGA; VAN GENUCHTEN, 1989). A exclusão aniônica resulta da repulsão de ânions das superfícies carregadas negativamente, associadas com argila e matéria orgânica ionizável (BOLT, 1979; JAMES; RUBIN, 1986).

Resultados semelhantes também foram encontrados por Rossi et al. (2007), que atribuíram as maiores perdas de nitrato no solo de textura argilosa às cargas negativas. Conforme Muchovej e Rechcigl (1994), solos de textura mais grosseira e de baixo conteúdo de matéria orgânica tendem a permitir maiores perdas de nitrato por lixiviação. Entretanto, as perdas de nitrato estão mais relacionadas ao fato deste ser repelido pelas cargas negativas dos coloides do solo (PIOVESAN et al., 2009).

Pela análise das curvas das amostras deformadas do S1 com a eluição de $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3, em todas elas a ascensão das curvas iniciou por volta de 2,0 VP, enquanto para as amostras deformadas do S2, a ascensão das curvas teve início em torno de 0,25 VP, para os três solutos.

A Tabela 11 apresenta o resumo da análise da variância (quadrado médio) dos principais parâmetros de transporte do nitrato para as amostras deformadas de S1, para os solutos $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3. Verifica-se que não houve diferença ao nível de 5% significância entre os solutos aplicados para amostra deformada do S1, para todos os parâmetros de transporte analisados; logo, não houve influência dos cátions cálcio, amônio e potássio no deslocamento do nitrato ao longo do perfil do solo.

Tabela 11 - Resumo da análise de variância (quadrado médio) para amostras deformadas de S1 entre $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3

Fonte de Variação	G.L	P	R	v	λ	D
Tratamento	2	$21{,}99^{ns}$	$0{,}0001^{ns}$	$0{,}003^{ns}$	$0{,}04^{ns}$	$0{,}03^{ns}$
Resíduo	6	29,39	0,0008	0,011	0,07	0,04
Média Geral	-	22,75	0,94	0,67	0,95	0,64
C.V. (%)	-	23,83	3,07	15,73	28,44	32,07

ns – não significativo ($p > 0{,}05$), pelo teste F; (G.L.) Graus de liberdade; (C.V.) Coeficiente de variação.

Na Tabela 12 está apresentado o resumo da análise da variância (quadrado médio) dos principais parâmetros de transporte do nitrato para as amostras deformadas de S2 entre os solutos $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3. Verifica-se que não houve diferença em nível de 5%

significância entre os solutos aplicados para amostra deformada do S2, para todos os parâmetros de transporte analisados, não ocorrendo influência dos íons acompanhantes do deslocamento do nitrato no S2.

Tabela 12 - Resumo da análise de variância (quadrado médio) para amostras deformadas de S2 entre $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3

Fonte de Variação	G.L	P	R	v	λ	D
Tratamento	2	$22{,}87^{ns}$	$0{,}19^{ns}$	$0{,}011^{ns}$	$69{,}19^{ns}$	$0{,}22^{ns}$
Resíduo	6	9,58	0,28	0,010	53,53	0,47
Média Geral	-	5,37	1,03	0,18	6,88	0,94
C.V. (%)	-	57,68	51,57	56,36	106,34	72,79

ns – não significativo ($p > 0{,}05$), pelo teste F; (G.L.) Graus de liberdade; (C.V.) Coeficiente de variação.

Na Tabela 13 encontra-se o resumo da análise da variância (quadrado médio) dos principais parâmetros de transporte do nitrato para as amostras deformadas de S1 e S2 entre os solutos $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3. Verifica-se que houve diferença em nível de 5% significância entre os solutos aplicados para amostras deformadas do S1 e S2 para os parâmetros de transporte P, v e λ.

Tabela 13 - Resumo da análise de variância (quadrado médio) para amostras deformadas de S1 e S2 entre $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3

Fonte de Variação	G.L	P	R	v	λ	D
Tratamento	5	289,87*	$1{,}01^{ns}$	0,22*	7,26*	$0{,}18^{ns}$
Resíduo	12	19,48	1,04	0,01	1,09	0,26
Média Geral	-	14,06	0,98	0,42	3,92	0,79
C.V. (%)	-	31,40	0,09	24,18	61,23	64,03

*Significativo ($p < 0{,}05$) e ns – não significativo ($p > 0{,}05$), pelo teste F; (G.L.) Graus de liberdade; (C.V.) Coeficiente de variação

A Tabela 14 apresenta o resultado do teste de comparação múltipla de médias entre as amostras deformadas de S1 e S2 para os solutos $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3 pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade. Verifica-se que houve diferença para o número de Peclet entre S1 e S2 na aplicação de $Ca(NO_3)_2$ e KNO_3; entretanto, não houve diferença entre as médias entre os diferentes solos para o NH_4NO_3. Para v houve diferença apenas entre os solos, enquanto que λ diferiu para $Ca(NO_3)_2$ entre S1 e S2 e para KNO_3 entre S1 e S2; entretanto, para NH_4NO_3 as médias de λ no S1 e no S2 não diferiram entre si. O fato dos parâmetros de transporte do nitrato para NH_4NO_3 não terem diferido entre os solos, enquanto

para os outros solutos terem diferido, pode ter sido causado pela transformação de amônio em nitrato.

Tabela 14 - Teste de comparação múltipla de médias para os principais parâmetros de transporte de nitrato entre amostras deformadas de S1 e S2 para $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3

Tratamento	P	Tratamento	v	Tratamento	λ
S1 $Ca(NO_3)_2$	25,73 a	S1 NH_4NO_3	0,69 a	S2 KNO_3	12,23 a
S1 KNO_3	22,07 a	S1 KNO_3	0,68 a	S2 $Ca(NO_3)_2$	5,46 a
S1 NH_4NO_3	20,44 ab	S1 $Ca(NO_3)_2$	0,63 a	S2 NH_4NO_3	2,95 ab
S2 NH_4NO_3	8,54 bc	S2 NH_4NO_3	0,24 b	S1 NH_4NO_3	1,02 bc
S2 $Ca(NO_3)_2$	4,08 c	S2 KNO_3	0,15 b	S1 KNO_3	1,01 c
S2 KNO_3	3,49 c	S2 $Ca(NO_3)_2$	0,13 b	S1 $Ca(NO_3)_2$	0,82 c

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os valores obtidos do número de Peclet para as BTC's deformadas de S1, para todas as fontes de nitrato, foram superiores aos valores de P das BTC's de S2, o que confirma maior velocidade de convecção no primeiro solo, devido à predominância de macroporos, responsáveis diretos pela condução da água durante os processos de infiltração, conforme Libardi (2005).

2.3.4 Amostras de solos indeformadas para nitrato de cálcio

Na Figura 6 estão representadas as curvas de distribuição de efluente do nitrato de cálcio para as amostras indeformadas do solo S1.

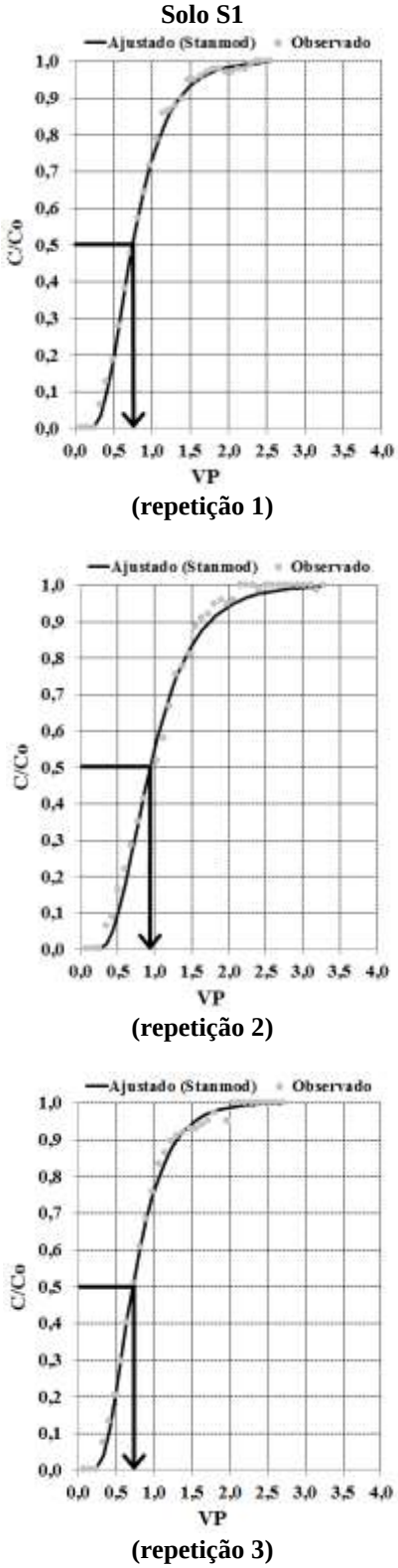


Figura 6 - Curvas de distribuição de nitrato para a fonte de nitrato $Ca(NO_3)_2$, observadas e ajustadas pelo modelo STANMOD, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^-, das amostras de solo indeformadas para o solo S1 (em que C/C_0 é a concentração relativa e VP é o volume da solução dividido pelo volume de poros da coluna)

Na Tabela 15 podem ser observados os parâmetros de transporte do nitrato nas amostras indeformadas de S1 para $Ca(NO_3)_2$, estando os parâmetros P e R no intervalo de confiança de 95%, com seus respectivos desvios padrões. Verifica-se um ajuste satisfatório dos dados observados e na estimativa dos parâmetros.

Tabela 15 - Parâmetros de transporte de nitrato nas amostras indeformadas de S1, para o soluto $Ca(NO_3)_2$, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^-

Solo	BTC	P Média ± DP*	R Média ± DP*	v (cm min^{-1})	λ (cm)	D (cm^2 min^{-1})	q (cm min^{-1})	ρ (kg dm^{-3})	α (m^3 m^{-3})
	1	8,57 ± 0,65	0,83 ± 0,01	0,11	2,33	0,26	0,06		
S1	2	8,00 ± 1,12	0,55 ± 0,01	0,11	2,37	0,14	0,06	1,23	0,5269
	3	8,78 ± 0,82	0,80 ± 0,01	0,12	2,28	0,27	0,06		

* DP é o desvio padrão do software STANMOD na estimativa dos parâmetros

A Tabela 16 apresenta a análise de estatística descritiva dos parâmetros de transporte do nitrato nas amostras indeformadas de S1 para o soluto $Ca(NO_3)_2$. Os resultados obtidos pela análise de estatística descritiva para todos os parâmetros apresentaram valores de tendência central (média e mediana) bem próximos, apresentando valores de assimetria próximos de zero, levando a uma distribuição normal, sendo também confirmado pelo teste de Shapiro–Wilk em nível de 5% de probabilidade.

Tabela 16 - Estatística descritiva dos parâmetros de transporte de NO_3^- na amostra indeformada de S1 para $Ca(NO_3)_2$

Fator	Mín.	Máx.	Média	Mediana	DP	CV (%)	Var.	Cs	Ck	W
α	0,53	0,53	0,53	0,53	0,00	0,00	0,00	-	-	ns
D	0,14	0,27	0,22	0,26	0,07	0,32	0,01	-0,38	-2,33	ns
ρ	1,23	1,23	1,23	1,23	0,00	0,00	0,00	-	-	ns
λ	2,28	2,37	2,33	2,33	0,05	0,02	0,00	-0,07	-2,33	ns
P	8,00	8,78	8,45	8,57	0,40	0,05	0,16	-0,27	-2,33	ns
q	0,06	0,06	0,06	0,06	0,00	0,00	0,00	-	-	ns
R	0,55	0,83	0,73	0,80	0,15	0,21	0,02	-0,37	-2,33	ns
v	0,11	0,12	0,11	0,11	0,01	0,05	0,00	0,38	-2,33	ns

Mín. = mínimo; Máx. = máximo; DP = desvio padrão; CV (%) = coeficiente de variação; Var. = Variância; Cs = assimetria; Ck = curtose; e ns distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk (W) a 5% de probabilidade.

2.3.5 Amostras de solos indeformadas para nitrato de amônio

Na Tabela 17 podem ser observados os parâmetros de transporte do nitrato nas amostras indeformadas de S1 para NH_4NO_3.

Tabela 17 - Parâmetros de transporte de nitrato nas amostras indeformadas de S1, para o soluto NH_4NO_3, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^-

Solo	BTC	P Média ± DP*	R Média ± DP*	v (cm min^{-1})	λ (cm)	D (cm^2 min^{-1})	q (cm min^{-1})	ρ (kg dm^{-3})	α (m^3 m^{-3})
	1	14,59 ± 4,13	0,83 ± 0,03	0,04	1,37	0,06	0,02		
S1	2	9,03 ± 1,51	0,89 ± 0,02	0,39	2,21	0,85	0,20	1,23	0,5269
	3	5,99 ± 1,10	0,65 ± 0,02	0,14	3,34	0,48	0,08		

* DP é o desvio padrão do software STANMOD na estimativa dos parâmetros

A Tabela 18 apresenta a análise de estatística descritiva dos parâmetros de transporte do nitrato nas amostras indeformadas de S1 para o soluto NH_4NO_3. Os resultados obtidos pela análise de estatística descritiva para todos os parâmetros apresentaram valores de tendência central (média e mediana) bem próximos, apresentando valores de assimetria próximos de zero, levando a uma distribuição normal; este fato foi também confirmado pelo teste de Shapiro–Wilk em nível de 5% de probabilidade.

Tabela 18 - Estatística descritiva dos parâmetros de transporte de NO_3^- na amostra indeformada de S1 para NH_4NO_3

Fator	Mín.	Máx.	Média	Mediana	DP	CV (%)	Var.	Cs	Ck	W
α	0,53	0,53	0,53	0,53	0,00	0,00	0,00	-	-	ns
D	0,06	0,85	0,46	0,48	0,40	0,85	0,16	-0,04	-2,33	ns
ρ	1,23	1,23	1,23	1,23	0,00	0,00	0,00	-	-	ns
λ	1,37	3,34	2,31	2,21	0,99	0,43	0,98	0,10	-2,33	ns
P	5,99	14,59	9,87	9,03	4,36	0,44	19,02	0,19	-2,33	ns
Q	0,02	0,20	0,10	0,08	0,09	0,92	0,01	0,21	-2,33	ns
R	0,65	0,89	0,79	0,83	0,12	0,16	0,02	-0,29	-2,33	ns
v	0,04	0,39	0,19	0,14	0,18	0,95	0,03	0,26	-2,33	ns

Mín. = mínimo; Máx. = máximo; DP = desvio padrão; CV (%) = coeficiente de variação; Var. = Variância; Cs = assimetria; Ck = curtose; e ns distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk (W) a 5% de probabilidade.

Na Figura 7 estão representadas as curvas de distribuição de efluente do nitrato de amônio para as BTC's de amostras indeformadas do S1.

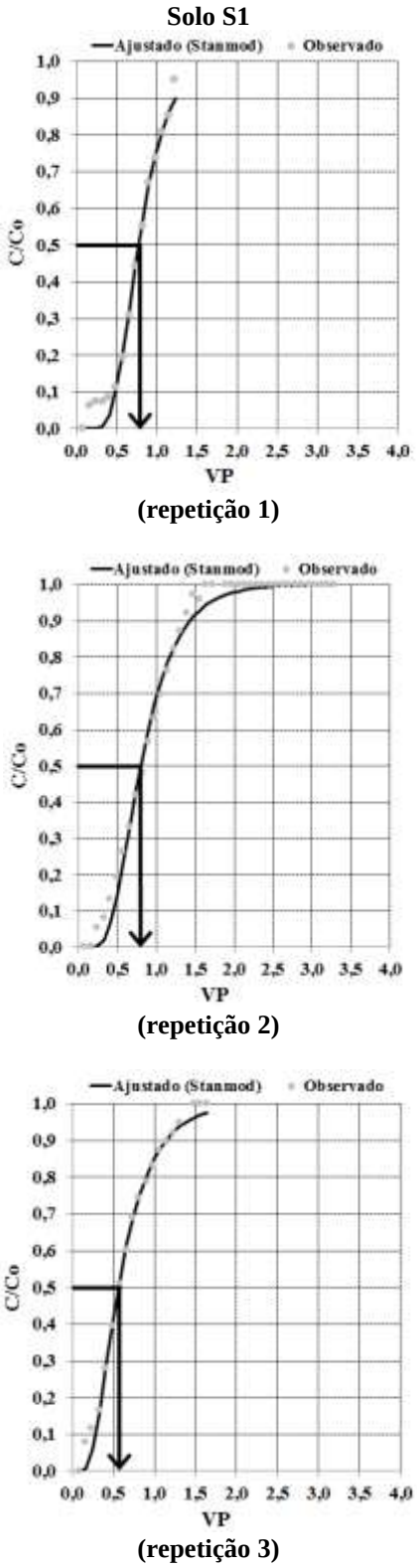


Figura 7 - Curvas de distribuição de nitrato para a fonte de nitrato NH_4NO_3, observadas e ajustadas pelo modelo STANMOD, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^-, das amostras de solo indeformadas para o solo S1 (em que C/C_0 é a concentração relativa e VP é o volume da solução dividido pelo volume de poros da coluna)

2.3.6 Amostras de solo indeformadas para nitrato de potássio

Na Tabela 19 podem ser observados os parâmetros de transporte do nitrato nas amostras indeformadas de S1 para KNO_3.

Tabela 19 - Parâmetros de transporte de nitrato nas amostras indeformadas de S1 para o soluto KNO_3, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^-

Solo	BTC	P Média ± DP*	R Média ± DP*	v (cm min^{-1})	λ (cm)	D (cm^2 min^{-1})	q (cm min^{-1})	ρ (kg dm^{-3})	α (m^3 m^{-3})
	1	6,90 ± 0,63	0,82 ± 0,01	0,17	2,90	0,49	0,09		
S1	2	9,40 ± 1,41	1,08 ± 0,02	0,17	2,13	0,36	0,09	1,23	0,5269
	3	6,94 ± 0,73	0,97 ± 0,02	0,02	2,74	0,05	0,01		

* DP é o desvio padrão do software STANMOD na estimativa dos parâmetros

Na Tabela 20 pode-se observar o resultado da análise da estatística descritiva dos parâmetros de transporte do nitrato nas amostras indeformadas de S1 para o soluto NH_4NO_3. Os resultados obtidos pela análise estatística descritiva para todos os parâmetros apresentaram valores de tendência central (média e mediana) bem próximos, apresentando valores de assimetria próximos de zero, o que leva a uma distribuição normal, sendo também confirmado pelo teste de Shapiro–Wilk em nível de 5% de probabilidade.

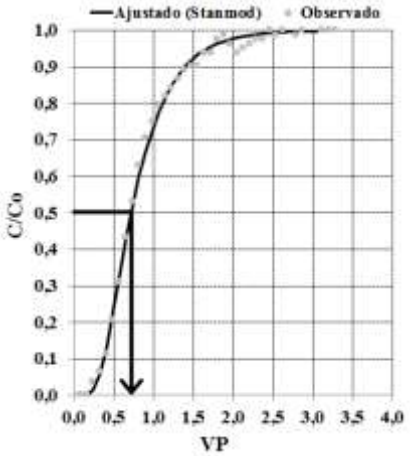
Tabela 20 - Estatística descritiva dos parâmetros de transporte de NO_3^- na amostra indeformada de S1 para KNO_3

Fator	Mín.	Máx.	Média	Mediana	DP	CV (%)	Var.	Cs	Ck	W
α	0,53	0,53	0,53	0,53	0,00	0,00	0,00	-	-	ns
D	0,05	0,49	0,30	0,36	0,23	0,75	0,05	- 0,25	- 2,33	ns
ρ	1,23	1,23	1,23	1,23	0,00	0,00	0,00	-	-	ns
λ	2,13	2,90	2,59	2,74	0,41	0,16	0,17	- 0,32	- 2,33	ns
P	6,90	9,40	7,75	6,94	1,43	0,18	2,05	0,38	- 2,33	ns
q	0,01	0,09	0,06	0,09	0,05	0,73	0,00	- 0,38	- 2,33	ns
R	0,82	1,08	0,96	0,97	0,13	0,14	0,02	- 0,10	- 2,33	ns
v	0,02	0,17	0,12	0,17	0,09	0,72	0,01	- 0,38	- 2,33	ns

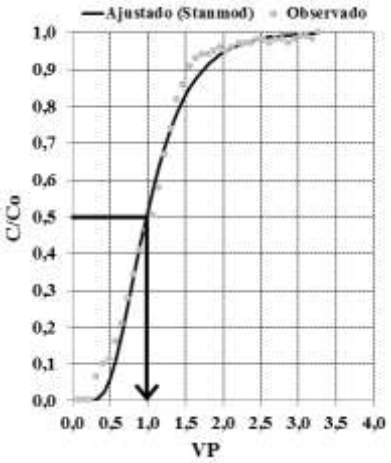
Mín. = mínimo; Máx. = máximo; DP = desvio padrão; CV(%) = coeficiente de variação; Var. = Variância; Cs = assimetria; Ck = curtose; e ns distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk (W) a 5% de probabilidade.

Na Figura 8 estão representadas as curvas de distribuição de efluente do nitrato de potássio para as amostras indeformadas do solo S1.

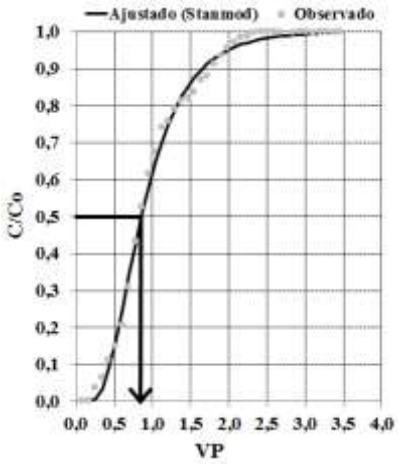
Solo S1



(repetição 1)



(repetição 2)



(repetição 3)

Figura 8 - Curvas de distribuição de nitrato para a fonte de nitrato KNO_3, observadas e ajustadas pelo modelo STANMOD, na concentração de 50 g m^{-3} de NO_3^-, das amostras de solo indeformadas para o solo S1 (em que C/C_0 é a concentração relativa e VP é o volume da solução dividido pelo volume de poros da coluna)

Verifica-se um ajuste satisfatório a dos dados observados à estimativa dos parâmetros.

A elaboração das BTCs das amostras indeformadas do solo 2 não foi possível de ser realizada devido a problemas ocorridos durante a coleta de solo, em que houve elevada compactação do solo, ocasionando estagnação de água e solução na coluna de solo, comprometendo assim o desenvolvimento do experimento. Esse tipo de problema não ocorreu nas amostras do solo 1 indeformado devido às caraterísticas deste solo, que são mais favoráveis ao experimento. Faz-se necessário o desenvolvimento e a elaboração de novas tecnologias que possibilitem a coleta indeformada de solos sem que haja modificação em sua estrutura.

A ocorrência de fluxos preferenciais no solo indeformado, caminhos pré-existentes ou ocasionados durante a coleta das amostras, podem ter ocasionado os diferentes valores da velocidade da solução nas colunas das amostras indeformadas do S1 (Tabelas 15, 7 e 19).

Assim como nas amostras de deformadas de S1 e S2, verifica-se que o modelo STANMOD obteve bom ajuste aos dados observados nas amostras indeformadas do S1.

Na Tabela 21 encontra-se a análise de variância (quadrado médio) para amostras indeformadas de S1 entre $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3. Verifica-se que não houve diferença em nível de 5% de significância entre os solutos aplicados nas amostras indeformadas de S1 para todos os principais parâmetros de transporte do nitrato.

Tabela 21 - Resumo da análise de variância (quadrado médio) para amostras indeformadas de S1 entre $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3

Fonte de Variação	G.L	P	R	v	λ	D
Tratamento	2	$3{,}51^{ns}$	$0{,}042^{ns}$	$0{,}005^{ns}$	$0{,}08^{ns}$	$0{,}05^{ns}$
Resíduo	6	7,08	0,019	0,013	0,38	0,07
Média Geral	-	8,69	0,82	0,14	2,41	0,33
C.V. (%)	-					

ns – não significativo ($p > 0{,}05$), pelo teste F; (G.L.) Graus de liberdade; (C.V.) Coeficiente de variação.

Na Tabela 22 é apresentada a análise de variância (quadrado médio) para as amostras deformadas e indeformadas de S1, utilizando os sais $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3. Verifica-se que houve diferença em nível de 5% de significância entre os solutos, aplicados nas amostras indeformadas de S1, para os parâmetros de transporte de nitrato P, v e λ.

Tabela 22 - Resumo da análise de variância (quadrado médio) para amostras deformadas e indeformadas de S1, utilizando os sais $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3

Fonte de Variação	G.L	P	R	v	λ	D
Tratamento	5	188,11*	$0,029^{ns}$	0,25*	1,96*	$0,12^{ns}$
Resíduo	12	18,23	0,010	0,01	0,23	0,06
Média Geral	-	15,72	0,88	0,40	1,68	0,48
C.V. (%)	-	27,16		11,21		

*Significativo ($p < 0,05$) e ns – não significativo ($p > 0,05$), pelo teste F; (G.L.) Graus de liberdade; (C.V.) Coeficiente de variação.

Na Tabela 23 é apresentado o resultado do teste de comparação múltipla de médias para os principais parâmetros de transporte do nitrato para as amostras deformadas e indeformadas de S1, entre os solutos $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3 pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade. Verifica-se que houve diferença para o número de Peclet entre as amostras deformadas e indeformadas de S1, na aplicação de $Ca(NO_3)_2$ e KNO_3; entretanto não houve diferença entre as médias entre os diferentes solos para o NH_4NO_3. Para v houve diferença apenas entre os solos, enquanto que λ diferiu para $Ca(NO_3)_2$ e também para KNO_3 entre as amostras deformadas e indeformadas de S1. Para NH_4NO_3 as médias de λ nas amostras deformadas e indeformadas de S1 não diferiram entre si.

Tabela 23 - Teste de comparação múltipla de médias para os principais parâmetros de transporte de nitrato entre amostras deformadas e indeformadas de S1 para $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3

Tratamento	P	Tratamento	v	Tratamento	λ
Deformada $Ca(NO_3)_2$	25,73 a	Deformada NH_4NO_3	0,69 a	Indeformada KNO_3	2,59 a
Deformada KNO_3	22,07 a	Deformada KNO_3	0,68 a	Indeformada $Ca(NO_3)_2$	2,33 a
Deformada NH_4NO_3	20,44 ab	Deformada $Ca(NO_3)_2$	0,63 a	Indeformada NH_4NO_3	2,31 ab
Indeformada NH_4NO_3	9,87 bc	Indeformada NH_4NO_3	0,19 b	Deformada NH_4NO_3	1,02 bc
Indeformada $Ca(NO_3)_2$	8,45 c	Indeformada KNO_3	0,12 b	Deformada KNO_3	1,01 bc
Indeformada KNO_3	7,75 c	Indeformada $K(NO_3)_2$	0,11 b	Deformada $Ca(NO_3)_2$	0,82 c

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Em todas as repetições das amostras indeformadas do solo S1 para os três solutos, foi necessário a aplicação de 2,5 VP para que a concentração do efluente coletado atingisse a concentração da solução aplicada. Logo, para as amostras indeformadas necessitou-se de uma

maior aplicação de volume da solução em relação à amostra deformada de S1, para que a concentração relativa atingisse o valor unitário. A necessidade de menores volumes de solução para as colunas das amostras deformadas de S1 ocorreram devido a modificação da estrutura original do solo, e consequente, alteração dos caminhos de percolação da solução, que pode ter levado a diminuição da agregação das partículas do solo.

Os valores do fator de retardamento (R) do nitrato, tanto para ambos os tipos de solos e nas amostras deformadas e indeformadas de solo, para $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3 foram inferiores a 1, indicando uma alta mobilidade desse ânion. Esta alta mobilidade também pode ser observada pela elevada inclinação das curvas de distribuição em todos os casos, em que o VP para C/C_0 = 0,5 foram inferiores a 1. Conforme já foi explicado anteriormente, também pode ser o caso em que está ocorrendo exclusão de nitrato no solo.

Comparando a ascensão das curvas das amostras deformadas e indeformadas de S1, verifica-se a ascensão ocorreu um pouco anterior a 0,5 VP nas amostras indeformadas, enquanto nas amostras deformadas teve início em 0,5 VP.

Analisando os resultados obtidos entre os solutos aplicados, quais sejam, $Ca(NO_3)_2$, NH_4NO_3 e KNO_3, nas repetições das BTC's das amostras indeformadas do S1, assim como nas amostras deformadas do S1, percebe-se que não foi verificada influência dos cátions acompanhantes do NO_3^- em seu deslocamento. Assim, a alta mobilidade do nitrato nesses solos está relacionada com as características desses solos, devido à presença de pouca carga positiva nos coloides dos solos.

De acordo com a teoria de transporte de solutos, o coeficiente de dispersão (D) é proporcional à velocidade da solução no solo, tendo como coeficiente de proporcionalidade a dispersividade (λ); logo, os maiores valores de v possuem os maiores valores de D. Na Figura 9 verifica-se a existência de correlação ($p < 0,05$ e $r > 0$) entre a velocidade das soluções nos solos 1, deformados e indeformados, e o coeficiente de dispersão.

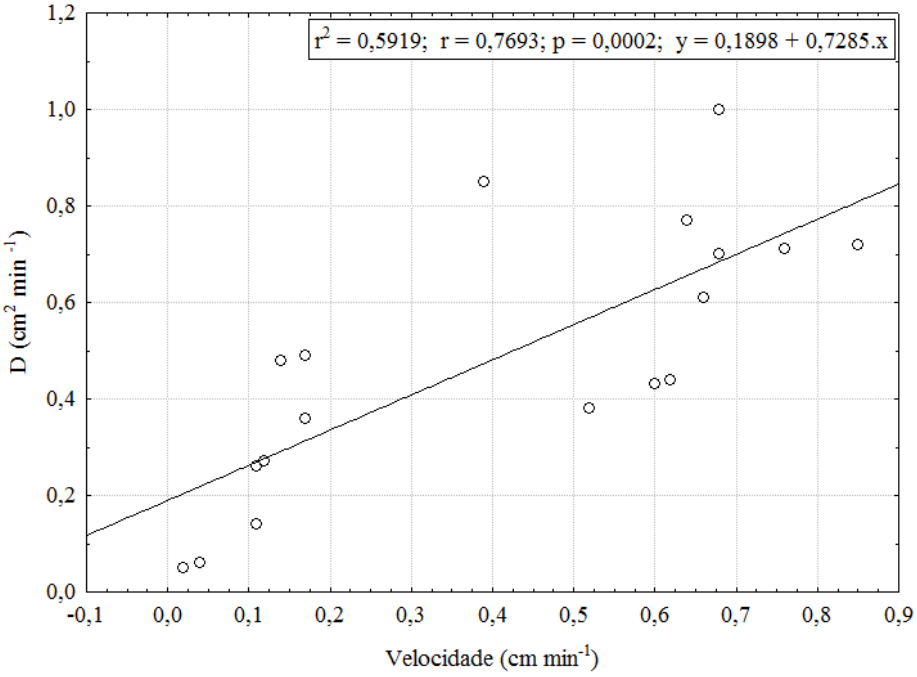


Figura 9 - Coeficiente de dispersão ($\boldsymbol{D}$) em função da velocidade da solução ($\boldsymbol{v}$), nas amostras de solo, e parâmetros de correlação linear

Correa et al. (1999), em experimento de deslocamento miscível com sulfona de aldicarbe em colunas de solos deformados das principais regiões produtoras de batata de Minas Gerais, observou que houve forte correlação entre os valores do coeficiente de dispersão e a velocidade real da solução, indicando que a variabilidade observada em D pode ser creditada, em grande parte, às variações de v. Segundo os autores, esta observação corrobora com as afirmações de Biggar e Nielsen (1962), Nascimento Filho et al. (1979), Lourenço (1987), Jacobsen et al. (1992) e Matos (1995), esses autores afirmam que o transporte dispersivo está diretamente relacionado à velocidade de avanço da solução e que esta forma de movimento de solutos no solo assume relevância à medida em que a velocidade aumenta.

Comparando os resultados dos parâmetros de transporte entre as amostras deformadas e indeformadas de S1, em todos os solutos aplicados, verifica-se que as velocidades da solução nas colunas de solo indeformadas foram inferiores, devido a uma maior estruturação do solo, havendo superestimativa da velocidade da solução nas colunas deformadas de solo; consequentemente, estas apresentaram menores valores do coeficiente de dispersão e maiores valores de dispersividade.

Na Figura 10 pode ser observada uma correlação positiva ($p < 0,05$ e $r > 0$) entre a densidade do solo e a velocidade da solução no solo, sendo a densidade responsável pelas diferentes velocidades obtidas em cada BTC, principalmente entre os S1 e S2.

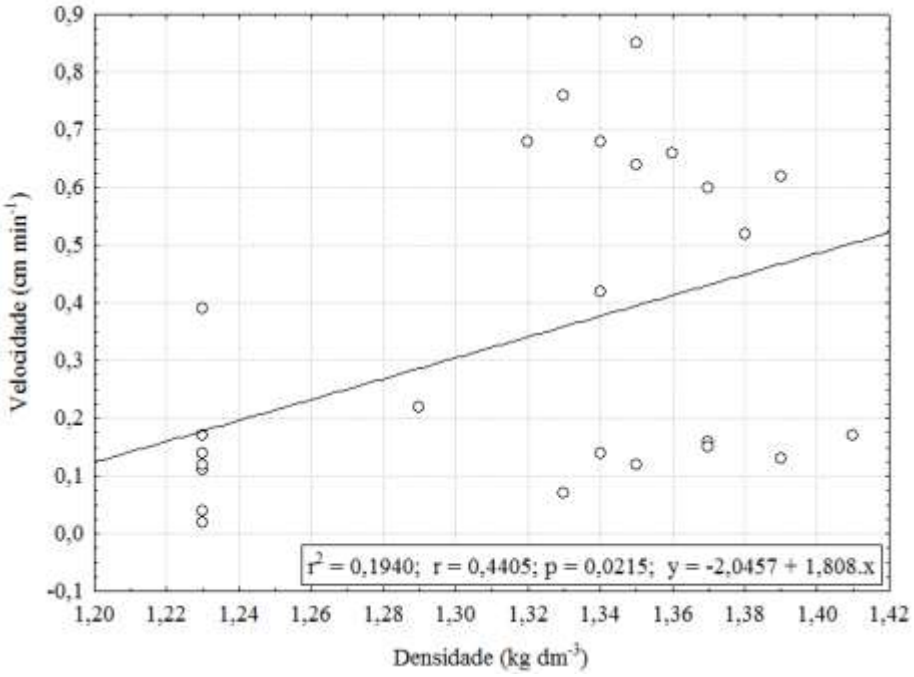


Figura 10 - Velocidade da solução nas amostras de deformadas e indeformadas de S1 e deformadas S2 ($\boldsymbol{v}$) em função da densidade do solo (ρ), e parâmetros de correlação linear

Rossi et al. (2007), em experimento com amostras deformadas e indeformadas de dois solos de diferentes texturas (Latossolo Vermelho-Amarelo, textura média, e Latossolo Vermelho-Amarelo, textura argilosa) obteveram os parâmetros de transporte do nitrato (velocidade da solução nos poros (v), fator de retardamento (R), dispersividade (λ) e o coeficiente de dispersão (D)) em cada solo, os quais foram ajustados pelo programa computacional CXTFIT. Observou-se que os valores dos parâmetros avaliados, em ambos os solos, com exceção da dispersividade, foram superestimados pelas curvas de eluição elaboradas a partir de amostras deformadas quando comparadas às amostras indeformadas. Sampaio et al. (2010) também encontraram diferenças no transporte de nitrato em ensaios de lixiviação de íons em colunas de solo deformadas em indeformadas mediante aplicação de água residuária de suinocultura, sendo atribuída à metodologia da coleta das colunas indeformadas essa diferença; esta foi, provavelmente, devida à compactação do solo durante a amostragem e à dificuldade no bloqueio de caminhos preferenciais ao longo de toda a coluna. Segundo Rossi et al. (2007), o uso de amostras indeformadas é mais adequado; entretanto, o

preenchimento da coluna com amostra de solo deformado não foi representativo para o parâmetro de transporte do íon nitrato, considerando-se, assim, como situação ideal o solo estruturado.

Na Figura 11 pode ser verificada a existência de elevada correlação (p = 0,000001 e r = 0,7860) entre P e v, como já era previsto, pois o número de Peclet indica o tipo de transporte predominante no processo.

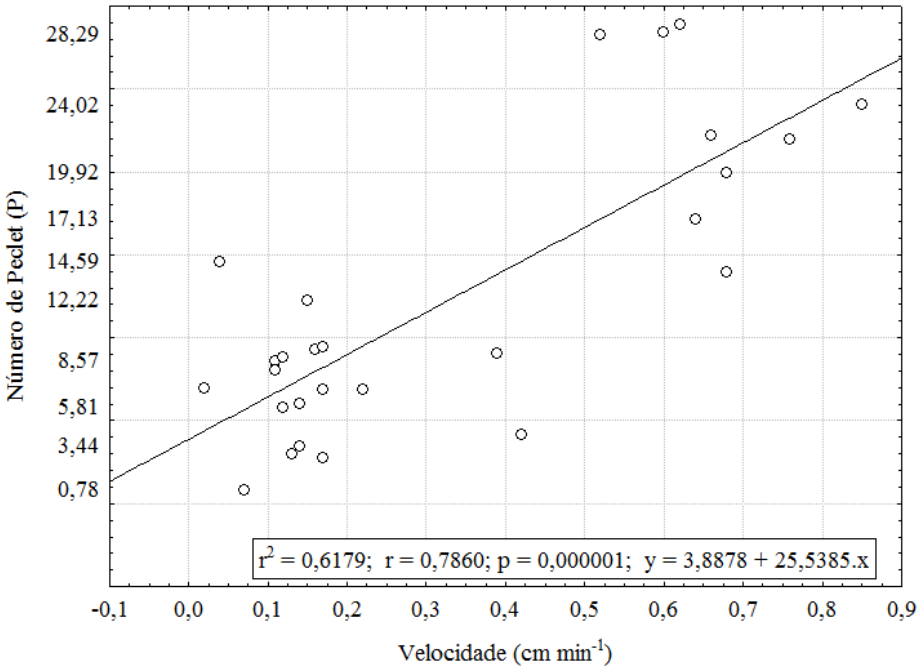


Figura 11 - Velocidade da solução nas amostras deformadas e indeformadas de S1 e deformadas de S2 ($\boldsymbol{v}$) em função do número de Peclet (P), e parâmetros da correlação linear

O solo S2, em geral, apresentou maiores valores do coeficiente de dispersão, caracterizando assim um efeito mais pronunciado da dispersão nesse solo. Esse solo, também, apresentou menores valores do número de Peclet, o que indica uma dispersividade mais importante que no solo S1. Diferentes valores do coeficiente de dispersão, entre as diferentes colunas do mesmo solo, e em um mesmo soluto aplicado podem ser consequência das diferentes velocidades de avanço da solução. Pinho (2009) determinou os parâmetros de transporte de nitrato em Latossolo Vermelho Amarelo e Nitossolo Vermelho, obtendo maiores valores de P e R para o Latossolo Vermelho Amarelo e maiores valores de λ e D para o Nitossolo Vermelho.

3 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, pôde-se concluir que:

a) O modelo STANMOD obteve de maneira eficientemente os parâmetros de transporte do nitrato, o que auxiliará no entendimento da sua dinâmica no solo;
b) As maiores perdas de nitrato por lixiviação ocorreram no Nitossolo Vermelho (S2);
c) Pelos valores do fator de retardamento (R) do nitrato para os solutos estudados, assim como pelas curvas de distribuição de nitrato nos solos, pode-se afirmar que ocorreu baixa interação entre o nitrato e os solos estudados, devido à presença predominante de cargas negativas nesses solos. Assim, os riscos de contaminação de águas subterrâneas por nitrato é preocupante, fazendo-se necessário o conhecimento da quantidade correta de fertilizantes a serem aplicados e também do momento correto de aplicação, a fim de evitar perdas por lixiviação;
d) A metodologia aplicada para coleta de amostra indeformada de solo mostrou-se ineficiente para o solo com maior percentual de argila; assim, existe a necessidade de desenvolvimento de novas técnicas de coleta de amostras indeformadas de solo que não prejudiquem e comprometam a estrutura do solo;
e) Ensaios de eluição com amostras de solo deformadas podem ser realizados sem o prejuízo do entendimento do deslocamento de solutos no solo, desde que o preenchimento das colunas de solos corresponda às condições de campo;
f) A velocidade da solução no solo, assim como a estruturação do solo e a presença de regiões de estagnação, são fatores que influenciam no deslocamento da solução do solo, já que está irá influenciar na existência de fluxos preferenciais;
g) Pela analise dos parâmetros de transporte do nitrato para as três diferentes fontes testadas, em ambos os solos, não foi observada influência do íon acompanhante no deslocamento do nitrato no solo; porém, verificou-se que existe influência da textura do solo, agregação das partículas do solo, da velocidade da solução no solo e da presença de matéria orgânica.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, M.A.K.; CAMARGO, O.A. Chromium movement in columns of two highly weathered soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 35, p. 599-613, 2004.

_____. Adsorção de nitrato em solos com cargas variáveis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, p. 369-376, 2005.

_____. Manipulação de carga e movimento de nitrato em horizontes B de um Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 2, p. 204-212, 2010.

ALVARENGA, M.A.R. **Crescimento, teor e acúmulo de nutrientes em alface-americana (*Lactuca sativa* L.) sob doses de nitrogênio aplicadas no solo e de níveis de cálcio aplicados via foliar**. 1999. 117 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.

ÁLVAREZ-BENEDÍ, J.; ISLA, T.; CARTÓN, A.; BOLADO, Y.S. Efecto de la velocidad de flujo en los parámetros de transporte de solutos. In: MUÑOZ-CARPENA, R.; RITTER, A.; TASCÓN, C. (Ed.). **Estudios en la zona no saturada del suelo**. La Laguna: ICIA, 1999. p. 157-161.

ANAMI, M.H.; SAMPAIO, S.C.; SUSZEK, M.; GOMES, S.D.; QUEIROZ, M.M.F. Deslocamento miscível de nitrato e fosfato proveniente de água residuária da suinocultura em colunas de solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 1, p. 75–80, 2008.

BARIZON, R.R.M.; LAVORENTI, A.; REGITANO, J. B.; PRATA, F.; TORNISIELO, V. L. Simulação do transporte e da sorção de imazaquim em colunas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 615-623, 2006.

BIGGAR, J.W.; NIELSEN, D.R. Miscible displacement: II. Behavior of tracers. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 26, n. 2, p. 125-128, 1962.

BOAST, C.W. Modeling the movement of chemicals in soils by water. **Soil Science**, Baltimore, v. 115, p. 224-230, 1973.

BOLT, G.H. (Ed.). **Soil chemistry B:** physico-chemical models. New York: Elsevier Scientific, 1979. 528 p.

BORGES JÚNIOR, J.C.; FERREIRA, P.A. Programa computacional para cálculo de parâmetros do transporte de solutos em deslocamento de fluídos miscíveis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2002. p. 1-4.

_____. Equações e programa computacional para cálculo do transporte de solutos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 604-611, 2006.

BRESLER, E. Convective and pore scale dispersive solute transport in unsaturated heterogeneous fields. **Water Resources Research**, Washington, v. 37, n. 6, p. 1683-1693, 1981.

BURT, T.P.; HEATHWAITE, A.L.; TRUDGILL, S.T. The politics of nitrate in the UK. In: BURT, T.P.; HEATHWAITE, A.L.; TRUDGILL, S.T. (Ed.). **Nitrate process, patterns and management.** Chichester: John Wiley and Sons, 1993. chap. 15, p. 404-408.

CAMPOS, T.M.; ELBACHÁ, A.T. Avaliação do fator de retardamento por adsorção no transporte de zinco em solos argilosos. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS-REGEO'91, 1991, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, 1991. p. 271-282.

CERETTA, C.A. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia/milho, no sistema de plantio direto. In: FRIES, M.R.; DALMOLIN, R.S.D. **Atualização em recomendação de adubação e calagem: ênfase em plantio direto**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1997. p. 112-124.

CORREA, M.M.; LIMA, L.A.; MARTINEZ, M.A.; RIGINATO, R.L.O.; SAMPAIO, S.C. Deslocamento miscível de sulfona de aldicarbe em colunas de solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 217-221, 1999.

COSTA, E.F.; FRANÇA, G.E.; ALVES, V.M.C. Aplicação de fertilizantes via água de irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 139, p. 63-69, 1986.

DOLTRA, J.; MUÑOZ, P. Simulation of nitrogen leaching from a fertigated crop rotation in a Mediterranean climate using the EU-Rotate_N and Hydrus-2D models. **Agricultural Water Management**, Washington, v. 97, p. 277-285, 2010.

DONN, M.J.; MENZIES, N.W. Simulated rainwater effects on anion exchange capacity and nitrate retention in Ferrosols. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 43, p. 33‑42, 2005a.

_____. The effect of ionic strength variation and anion competition on the development of nitrate accumulations in variable charge subsoils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 43, p. 43‑50, 2005b.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

FERNÁNDEZ, S.; VIDAL, D.; SIMÓN, E.; SUGRAÑES, L. Radiometric characteristics of Triticum aestivum cv. Astral under water and nitrogen stress. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 15, n. 9, p. 1867-1884, 1994.

FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. Micronutrientes no solo: Cobre. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. (Ed.). **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato; CNPq, 1991. p. 131-151.

FONSECA, B.; TEIXEIRA, A.; FIGUEIREDO, H.; TAVARES, T. Modeling of the Cr(VI) transport in typical soils of the North of Portugal. **Journal of Hazardous Materials**, New York, v. 167, p. 756-762, 2009.

GONÇALVES, A.D.M.A. **Efeito da temperatura no transporte dos íons potássio e nitrato no solo**. 2007. 83 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

GONÇALVES, A.D.M.C.; MIRANDA, J.H.; ROSSI, P.; SABADIN, J.F.G; KAMOGAWA, M.Y. Temperature effect in potassium and nitrate ions in soil transport. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 438-447, 2008.

HILLEL, D. **Fundaments of soil physics**. New York: Academic Press. 1908. 413 p.

JACOBSEN, O.H.; LEIJ, F.J.; van GENUCHTEN, M.TH. Lysimeter study of anion transport during steady flow through layered coarse-textured soil profiles. **Soil Science**, Baltimore, v. 154, n. 3, p. 196-205, 1992.

JAMES, R.V; RUBIN, J. Transport of chloride ion in a water-unsaturated soil exhibiting anion exclusion. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 1142-1149, 1986.

LEIJ, F.J.; BRADFORD, S.A. **3DADE:** a computer program for evaluating three-dimensional equilibrium solute transport in porous media. Riverside: USDA, ARS, Salinity Laboratory, 1994. (Research Report, 134).

LEIJ, F.J.; TORIDE, N. **N3DADE:** a computer program for evaluating nonequilibrium three dimensional equilibrium solute transport in porous media. Riverside: USDA, ARS, Salinity Laboratory, 1997. (Research Report, 143).

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 329 p.

LOPEZ, C.C. **Fertirrigacion:** cultivos hortícolas y ornamentales. 2. ed. Madrid: Mundi Prensa, 2000. 475 p.

LOURENÇO, R.S. **Deslocamento do íon potássio em Latossolo Roxo**. 1987. 75 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.

MARCIANO, C.R.; MORAES, S.O.; OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M.E. Efeito do lodo de esgoto e do composto de lixo urbano sobre a condutividade hidráulica de um Latossolo Amarelo saturado e não saturado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 1-9, 2001.

MAROUELLI, W.A.; SILVA, W.L.C.; SILVA, H.R. **Manejo da irrigação em hortaliças**. Brasília: EMBRAPA, SPI, 1996. 72 p.

MARSON, E.A.; LEOPOLDO, P.R. Caracterização quantitativa de escoamento em microbacia na região central do Estado de São Paulo. **Energia na Agricultura**, Londrina, v. 4, p. 1-8, 1999.

MATOS, A.T. **Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão do zinco, cádmio, cobre e chumbo em solos do município de Viçosa, MG.** 1995. 110 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

MATOS, A.T.; COSTA, L.M.; FONTES, M.P.F.; MARTINEZ, M.A. Correlação entre os fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão do zinco, cádmio, cobre e chumbo, e algumas propriedades físicas dos solos. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 6, n. 4, p. 235-246, 1998.

MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N. Modelo para simulação dinâmica de nitrato em colunas verticais de solo não saturado. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 235-241, 2002.

MUCHOVEJ, R.M.C.; RECHCIGL, J.E. Impacts of nitrogen fertilization of pastures and turfgrasses on water quality. In: LAL, R.; STEWART, B.A. (Ed.). **Soil processes and water quality**. Boca Raton: Lewis Publ., 1994. p. 91-135.

NASCIMENTO FILHO, V.F.; REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L. Deslocamento miscível do íon cloreto em terra roxa estruturada (Alfisol) saturada em condições de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 3, n. 2, p. 67-73, 1979.

NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Miscible displacement in soils: I. Experimental Information. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 25, n. 1, p. 1-5, 1961.

_____. Miscible displacement: III, Theoretical considerations. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 26, n. 3, p. 216-221, 1962.

_____. Miscible displacement: V. Exchange processes. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 27, p. 623-627, 1963.

NIELSEN, D.R.; JACKSON, R.D.; CARY, J.W.; EVANS, D.D. (Ed.). **Soil water**. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1972. 173 p.

OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO, C.R.; MORAES, S.O. Lixiviação de nitrato em um Latossolo Amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, p. 171-180, 2001.

OLIVEIRA, M.V.A.M.; VILLAS BÔAS, R.L. Uniformidade de distribuição do potássio e do nitrogênio em sistema de irrigação por gotejamento**. Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 95-103, 2008.

PINHO, R.E.C. **Teores de água no solo: desempenho e sensibilidade do modelo Hydrus-1D**. 2009. 83 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

PIOVESAN, R.P.; FAVARETTO, N.; PAULETTI, V.; MOTTA, A.C.V. REISSMAN, C.B. Perdas de nutrientes via subsuperfície em colunas de solo sob fertilização mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 757-766, 2009.

PRATA, F.; LAVORENTI, A.; VANDERBORGHT, J.; BURAUEL, P.; VEREECKEN, H. Miscible displacement, sorption and desorption of atrazine in a Brazilian Oxisol. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 2, p. 728-738, 2003.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R:** a language and environment for statistical computing. Vienna, R Foundation for Statistical Computing, 2012. Disponível em: <http://www.R-project.org>. Acesso em: 25 mar. 2013.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico; Fundação IAC, 1996. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RESENDE A.V. **Agricultura e qualidade da água:** contaminação da água por nitrato. Planaltina: EMBRAPA, 2002. 29 p. (Documento, 57).

ROSE, D.A.; ABBAS, F.; ADEY, M.A. The effect of surface solute interactions on the transport of solutes through porous materials**. European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 60, p. 398-411, 2009.

ROSSI, P.; MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N. Curvas de distribuição de efluentes do íon nitrato em amostras de solo deformadas e indeformadas. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p. 675-682, 2007.

ROTH, K. **Lecture notes in soil physics:** version 3.2. Stuttgart: University of Hohenheim, Institute of Soil Science, 1996. 180 p.

RUIZ, H.A.; FERREIRA, P.A.; ROCHA, G.C.; BORGES JÚNIOR, J.C.F. Transporte de solutos no solo. In: JONG VAN LIER, Q. (Ed.). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 213-240.

SAMPAIO, S.C.; CAOVILLA, F.A.; OPAZO, M.A.U.; NÓBREGA, L.H.P.; SUSZEK, M.; SMANHOTTO, A. Lixiviação de íons em colunas de solo deformado e indeformado. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 1, p. 150-159, 2010.

SANTOS, A.B.; FAGERIA, N.K.; ZIMMERMANN, F.J.P. Atributos químicos do solo afetado pelo manejo da água e do fertilizante potássico na cultura de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 12-16, 2002.

SANTOS, M.R.; MARTINEZ, M.A.; MATOS, A.T.; OLIVEIRA, R.A.; ZONTA, J.H. Uso da reflectometria do domínio do tempo para avaliar a distribuição de nitrato em colunas de solos fertirrigados. **Revista Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 4, n. 3, p. 67-81, 2009.

SERRANO, L.; CARBONELL, X.; MARFÁ, O. Nitrate leaching and strawberry production as affected by drip irrigation. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 2, p. 311-316, 1993.

SHAMIR, U.Y.; HARLEMAN, D.R.F. **Numerical and analytical solutions of dispersion problems in homogeneous and layered aquifers**. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Hydrodynamics Lab. Dep. Of Civil Engineering, 1966. 206 p. (Report, 89).

SILVA, N.F.; LELIS NETO, J.A.; TEXEIRA, M.B.; CUNHA, F.N.; MIRANDA, J.H.; COELHO, R.D. Distribuição de solutos em colunas de solo com vinhaça. **Irriga**, Botucatu, ed. esp., p. 340-350, 2012.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.Th.; ŠEJNA, M. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 7, p. 587-600, 2008.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.Th.; ŠEJNA, M.; TORIDE, N.; LEIJ, F.J. **The STANMOD computer software for evaluating solute transport in porous media using analytical solutions of convection-dispersion equation**: versions 1.0 and 2.0, U.S. Riverside: USDA, ARS, Salinity Laboratory, 1999. 32 p.

SOARES; M.R.; CASAGRANDE, J.C. Adsorção e modelos. In: RIBEIRO, M.R.; NASCIMENTO, C.W.A.; CANTALICE, J.R.B.; RIBEIRO FILHO, M.R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo VI**. Viçosa: SBCS, 2009. p. 71-201.

SOUZA, V.F.; SOUZA, A.P. Fertirrigação II: Tipos de produtos, aplicação e manejo. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, v. 47, p. 15-20, 1992.

TAYLOR, G.L; NEAL, L.A. Land treatment of water as industrial siting advantage. In: INDUSTRIAL WATER CONFERENCE, 37., 1982, West Lafayette. **Proceedings...** West Lafayette: Purdue University, 1982. p. 233-238.

TORIDE, N.; LEIJ, F.J.; VAN GENUCHTEN, M.Th. **The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments**: version 2.0. Riverside: U.S. Salinity Lab., 1995. (Research Report, 137).

TRIVEDI, J.; BABADAGLI, T. Scaling miscible displacement in fractured porous media using dimensionless groups. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Houston, v. 61, p. 58-66, 2008.

TUNDISI, J.G. **O futuro dos recursos.** São Carlos: Multi Ciência; Instituto Internacional de Ecologia, 2003. 15 p.

VALOCCHI, A.J. Describing the transport of ion-exchanging contaminants using an effective Kd approach. **Water Resource Research**, Washington, v. 20, n. 4, p. 499-503, 1984.

van GENUCHTEN, M.Th. **Determining transport parameters from solute displacement experiments**. Riverside: USDA, ARS, U. S. Salinity Laboratory, 1980. (Research Report, 118).

_____. **Non-equilibrium transport parameters from miscible displacement experiments.** Riverside: USDA, ARS, U. S. Salinity Laboratory, 1981. (Research Report, 119).

_____. Convective-dispersive transport of solutes involved in sequential first-order decay reactions. **Computers & Geosciences**, New York, v. 11, n. 2, p. 129-147, 1985.

van GENUCHTEN, M.Th.; WIERENGA, P.J. Solute dispersion coefficients and retardation factors. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis:** Madison: Soil Science Society of America, 1986. pt. 1: Physical and mineralogical methods, p. 1025-1054.

VANOTTI, M.B.; BUNDY, L.G. An alternative rationale for corn nitrogen fertilizer recommendations. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 7, n. 2, p. 243-249, 1994.

WANG, H. **Describing and predicting breakthrough curves for non-reactive solute transport in statistically homogeneous porous media**. Thesis (Degree of Doctor of Philosophy in Crop and Soil Environmental Science) - Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2002.

WIERENGA, P.J.; van GENUCHTEN, M.Th. Solute transport through small and large unsaturated soil columns. **Ground Water**, Westerville, v. 27, n. 1, p. 35-42, 1989.

WILD, A. Nitrate leaching under bare fallow at a site in Northern Nigeria. **Journal of Soil Science**, London, v. 23, p. 315-324, 1972.

YANG, J.E.; SKOGLEY, E.O.; SCHAFF, B.E.; KIM, J.J. A simple spectrophotometric determination of nitrate in water, resin and soil extracts. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 1108-1115, 1998.

ANEXOS

ANEXO A1 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção curva de distribuição de nitrato, para nitrato de cálcio ($Ca(NO_3)_2$), repetição 1 da amostra deformada do solo 1 (S1), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,079	0,000	0,000	1,184	0,893	0,853
0,158	0,000	0,000	1,263	0,913	0,902
0,237	0,000	0,000	1,342	0,943	0,937
0,316	0,000	0,000	1,421	0,952	0,960
0,395	0,000	0,001	1,500	0,962	0,975
0,474	0,000	0,007	1,579	0,981	0,985
0,553	0,011	0,031	1,658	0,972	0,991
0,632	0,085	0,089	1,737	0,981	0,994
0,710	0,194	0,184	1,816	0,991	0,997
0,789	0,339	0,309	1,895	0,991	0,998
0,868	0,429	0,447	1,974	0,981	0,999
0,947	0,552	0,578	2,052	0,991	0,999
1,026	0,694	0,692	2,131	1,000	1,000
1,105	0,769	0,783	2,210	1,000	1,000
2,289	1,000	1,000			

Parâmetros S1 Repetição 1

P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
28,40	0,93	0,60	0,43	0,72	1,37

ANEXO A2 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de cálcio ($Ca(NO_3)_2$), repetição 2 da amostra deformada do solo 1 (S1), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,080	0,000	0,000	1,363	0,942	0,982
0,160	0,000	0,000	1,443	0,988	0,989
0,241	0,000	0,005	1,524	1,000	0,993
0,321	0,000	0,025	1,604	0,977	0,996
0,401	0,000	0,075	1,684	0,977	0,998
0,481	0,011	0,164	1,764	0,988	0,999
0,561	0,021	0,283	1,844	0,988	0,999
0,642	0,073	0,418	1,925	0,988	1,000
0,722	0,166	0,550	2,005	1,000	1,000
0,802	0,297	0,667	2,085	1,012	1,000
0,882	0,427	0,764	2,165	0,988	1,000
0,962	0,548	0,837	2,245	1,012	1,000
1,042	0,650	0,891	2,326	1,012	1,000
1,123	0,723	0,929	2,406	1,000	1,000
1,203	0,842	0,954	2,486	1,000	1,000
1,283	0,908	0,971			

Parâmetros S1 Repetição 2

P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
28,87	0,96	0,62	0,44	0,71	1,39

ANEXO A3 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de cálcio ($Ca(NO_3)_2$), repetição 3 da amostra deformada do solo 1 (S1), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,077	0,000	0,000	1,849	1,000	0,993
0,154	0,000	0,000	1,926	1,000	0,995
0,231	0,000	0,000	2,003	1,000	0,997
0,308	0,000	0,000	2,080	0,976	0,998
0,385	0,000	0,004	2,157	1,000	0,999
0,462	0,000	0,020	2,235	1,000	0,999
0,539	0,043	0,061	2,312	1,012	0,999
0,616	0,138	0,135	2,389	1,012	1,000
0,693	0,273	0,235	2,466	0,976	1,000
0,771	0,355	0,352	2,543	1,036	1,000
0,848	0,478	0,470	2,620	1,000	1,000
0,925	0,571	0,580	2,697	1,012	1,000
1,002	0,666	0,676	2,774	1,000	1,000
1,079	0,730	0,756	2,851	1,024	1,000
1,156	0,784	0,820	2,928	1,000	1,000
1,233	0,851	0,869	3,005	1,000	1,000
1,310	0,919	0,906	3,082	0,988	1,000
1,387	0,965	0,934	3,159	0,988	1,000
1,464	0,976	0,954	3,236	1,000	1,000
1,541	1,012	0,968	3,313	1,000	1,000
1,618	1,012	0,978	3,390	1,000	1,000
1,695	1,012	0,985	3,467	1,000	1,000
1,772	1,012	0,990			

Parâmetros S1 Repetição 3

P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
19,92	0,91	0,68	0,70	1,03	1,34

ANEXO B1 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de cálcio ($Ca(NO_3)_2$), repetição 1 da amostra deformada do solo 2 (S2), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,073	0,000	0,000	1,028	0,755	0,705
0,147	0,000	0,006	1,102	0,768	0,737
0,220	0,000	0,038	1,175	0,755	0,765
0,294	0,000	0,099	1,249	0,816	0,791
0,367	0,078	0,173	1,322	0,816	0,813
0,441	0,170	0,253	1,395	0,816	0,833
0,514	0,316	0,330	1,469	0,828	0,850
0,588	0,448	0,403	1,542	0,828	0,866
0,661	0,488	0,468	1,616	0,816	0,880
0,734	0,655	0,527	1,689	0,828	0,892
0,808	0,617	0,580	1,763	0,816	0,903
0,881	0,693	0,626	1,836	0,840	0,913
0,955	0,718	0,668	1,910	0,840	0,922
Parâmetros S2 Repetição1					
P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
3,44	0,90	0,14	0,81	5,96	1,34

ANEXO B2 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de cálcio ($Ca(NO_3)_2$), repetição 2 da amostra deformada do solo 2 (S2), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,074	0,000	0,000	1,035	0,841	0,799
0,148	0,000	0,002	1,109	0,796	0,832
0,222	0,031	0,021	1,183	0,830	0,860
0,296	0,046	0,075	1,256	0,897	0,882
0,370	0,061	0,156	1,330	0,886	0,902
0,443	0,176	0,249	1,404	0,897	0,918
0,517	0,348	0,346	1,478	0,886	0,931
0,591	0,493	0,438	1,552	0,897	0,942
0,665	0,585	0,521	1,626	0,908	0,952
0,739	0,641	0,595	1,700	0,919	0,960
0,813	0,719	0,659	1,774	0,931	0,966
0,887	0,719	0,714	1,848	0,942	0,972
0,961	0,741	0,760	1,922	0,988	0,976

Parâmetros S2 Repetição 2

P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
5,81	0,75	0,12	0,42	3,53	1,35

ANEXO B3 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de cálcio ($Ca(NO_3)_2$), repetição 3 da amostra deformada do solo 2 (S2), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,076	0,000	0,000	1,744	0,848	0,846
0,152	0,000	0,005	1,819	0,858	0,859
0,227	0,011	0,032	1,895	0,869	0,871
0,303	0,054	0,084	1,971	0,869	0,882
0,379	0,109	0,149	2,047	0,879	0,892
0,455	0,164	0,219	2,123	0,879	0,900
0,531	0,254	0,289	2,198	0,890	0,908
0,606	0,323	0,353	2,274	0,890	0,916
0,682	0,391	0,414	2,350	0,900	0,923
0,758	0,460	0,470	2,426	0,910	0,929
0,834	0,494	0,521	2,502	0,910	0,934
0,910	0,574	0,566	2,578	0,900	0,940
0,986	0,641	0,607	2,653	0,890	0,944
1,061	0,752	0,643	2,729	0,890	0,949
1,137	0,773	0,677	2,805	0,900	0,953
1,213	0,730	0,706	2,881	0,910	0,956
1,289	0,773	0,733	2,957	0,900	0,960
1,365	0,784	0,757	3,032	0,900	0,963
1,440	0,858	0,779	3,108	0,900	0,965
1,516	0,858	0,798	3,184	0,910	0,968
1,592	0,827	0,816	3,260	0,910	0,970
1,668	0,848	0,832	3,336	0,920	0,973

Parâmetros S2 Repetição 3

P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
2,98	1,06	0,13	0,89	6,88	1,39

ANEXO C1 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de amônio (NH_4NO_3), repetição 1 da amostra deformada do solo 1 (S1), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,076	0,000	0,000	1,605	0,975	0,969
0,153	0,000	0,000	1,681	1,013	0,979
0,229	0,000	0,000	1,758	1,026	0,986
0,306	0,000	0,000	1,834	0,975	0,990
0,382	0,012	0,001	1,910	0,962	0,993
0,459	0,012	0,008	1,987	0,987	0,996
0,535	0,023	0,032	2,063	0,987	0,997
0,611	0,069	0,081	2,140	1,000	0,998
0,688	0,159	0,161	2,216	0,987	0,999
0,764	0,276	0,262	2,293	0,987	0,999
0,841	0,391	0,377	2,369	0,962	0,999
0,917	0,494	0,491	2,445	0,987	1,000
0,993	0,588	0,596	2,522	0,987	1,000
1,070	0,684	0,690	2,598	1,000	1,000
1,146	0,750	0,766	2,675	1,013	1,000
1,223	0,795	0,827	2,751	1,013	1,000
1,299	0,901	0,874	2,828	1,000	1,000
1,376	0,925	0,910	2,904	0,962	1,000
1,452	0,901	0,936	2,980	0,975	1,000
1,528	1,000	0,955	3,057	0,987	1,000

Parâmetros S1 Repetição 1

P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
21,98	0,96	0,76	0,71	0,93	1,33

ANEXO C2 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de amônio (NH_4NO_3), repetição 2 da amostra deformada do solo 1 (S1), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,078	0,000	0,000	1,648	1,000	0,974
0,157	0,000	0,000	1,727	0,988	0,982
0,235	0,000	0,000	1,805	0,988	0,988
0,314	0,000	0,000	1,884	1,012	0,992
0,392	0,011	0,001	1,962	1,000	0,995
0,471	0,011	0,009	2,041	1,000	0,996
0,549	0,021	0,035	2,119	0,988	0,998
0,628	0,084	0,089	2,198	0,976	0,998
0,706	0,176	0,173	2,276	1,000	0,999
0,785	0,296	0,281	2,355	1,000	0,999
0,863	0,415	0,397	2,433	1,000	1,000
0,942	0,515	0,514	2,512	1,000	1,000
1,020	0,617	0,619	2,590	0,988	1,000
1,099	0,668	0,710	2,669	1,000	1,000
1,177	0,763	0,784	2,747	0,976	1,000
1,256	0,840	0,843	2,826	0,988	1,000
1,334	0,907	0,887	2,904	0,988	1,000
1,413	0,918	0,920	2,983	1,000	1,000
1,491	0,976	0,944	3,061	0,988	1,000
1,570	0,976	0,962	3,140	1,012	1,000

Parâmetros S1 Repetição 2

P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
22,22	0,97	0,66	0,61	0,92	1,37

ANEXO C3 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de amônio (NH_4NO_3), repetição 3 da amostra deformada do solo 1 (S1), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,077	0,000	0,000	1,627	0,966	0,973
0,155	0,000	0,000	1,705	0,989	0,981
0,232	0,000	0,000	1,782	0,989	0,986
0,310	0,000	0,001	1,860	0,989	0,990
0,387	0,011	0,004	1,937	1,000	0,993
0,465	0,011	0,032	2,015	1,000	0,995
0,542	0,064	0,084	2,092	1,011	0,997
0,620	0,169	0,166	2,169	1,011	0,998
0,697	0,300	0,268	2,247	1,000	0,998
0,775	0,410	0,381	2,324	0,989	0,999
0,852	0,489	0,492	2,402	0,977	0,999
0,930	0,569	0,595	2,479	0,977	0,999
1,007	0,649	0,683	2,557	1,000	1,000
1,085	0,741	0,757	2,634	1,000	1,000
1,162	0,825	0,816	2,712	1,011	1,000
1,240	0,846	0,864	2,789	1,011	1,000
1,317	0,922	0,899	2,867	0,977	1,000
1,395	0,955	0,927	2,944	0,966	1,000
1,472	0,977	0,947	3,022	1,011	1,000
1,550	0,966	0,962	3,099	0,977	1,000

Parâmetros S1 Repetição 3

P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
17,13	0,91	0,64	0,77	1,20	1,35

ANEXO D1 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de amônio (NH_4NO_3), repetição 1 da amostra deformada do solo 2 (S2), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,075	0,000	0,000	1,046	0,807	0,789
0,149	0,000	0,000	1,121	0,817	0,831
0,224	0,000	0,003	1,196	0,838	0,865
0,299	0,014	0,020	1,271	0,880	0,892
0,374	0,028	0,066	1,345	0,902	0,914
0,448	0,097	0,138	1,420	0,902	0,932
0,523	0,201	0,231	1,495	0,912	0,946
0,598	0,333	0,332	1,570	0,956	0,957
0,673	0,455	0,432	1,644	0,967	0,966
0,747	0,550	0,524	1,719	0,945	0,973
0,822	0,653	0,607	1,794	0,967	0,979
0,897	0,694	0,678	1,869	0,956	0,983
0,972	0,745	0,739	1,943	0,967	0,987
Parâmetros S2 Repetição 1					
P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
9,25	0,80	0,16	0,35	2,22	1,37

ANEXO D2 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de amônio (NH_4NO_3), repetição 2 da amostra deformada do solo 2 (S2), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,073	0,000	0,000	1,825	0,902	0,898
0,146	0,000	0,001	1,898	0,926	0,909
0,219	0,023	0,015	1,971	0,914	0,918
0,292	0,045	0,052	2,044	0,950	0,927
0,365	0,090	0,108	2,117	0,914	0,934
0,438	0,165	0,175	2,190	0,926	0,941
0,511	0,249	0,246	2,263	0,962	0,947
0,584	0,310	0,318	2,336	0,962	0,952
0,657	0,381	0,386	2,409	0,902	0,957
0,730	0,421	0,449	2,482	0,938	0,961
0,803	0,532	0,507	2,555	0,914	0,965
0,876	0,573	0,560	2,628	0,975	0,968
0,949	0,635	0,607	2,701	0,950	0,972
1,022	0,645	0,649	2,774	0,950	0,974
1,095	0,614	0,687	2,847	1,000	0,977
1,168	0,775	0,721	2,920	0,987	0,979
1,241	0,832	0,751	2,993	1,000	0,981
1,314	0,764	0,778	3,066	0,975	0,983
1,387	0,809	0,802	3,139	0,975	0,985
1,460	0,775	0,823	3,212	0,975	0,986
1,533	0,878	0,842	3,285	0,987	0,987
1,606	0,902	0,858	3,358	1,000	0,989
1,679	0,843	0,873	3,431	1,000	0,990
1,752	0,832	0,886			

Parâmetros S2 Repetição 2					
P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min $^{-1}$)	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
4,14	0,98	0,42	2,06	4,95	1,34

ANEXO D3 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de amônio (NH_4NO_3), repetição 3 da amostra deformada do solo 2 (S2), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,075	0,000	0,000	1,493	0,950	0,959
0,149	0,000	0,000	1,568	0,937	0,969
0,224	0,000	0,001	1,642	0,975	0,977
0,299	0,012	0,007	1,717	1,000	0,983
0,373	0,035	0,034	1,792	0,975	0,987
0,448	0,082	0,091	1,866	0,987	0,990
0,523	0,163	0,177	1,941	0,962	0,993
0,597	0,275	0,278	2,016	0,975	0,995
0,672	0,386	0,387	2,090	0,987	0,996
0,746	0,486	0,491	1,493	0,950	0,959
0,821	0,598	0,586	1,568	0,937	0,969
0,896	0,700	0,669	1,642	0,975	0,977
0,970	0,734	0,738	1,717	1,000	0,983
1,045	0,793	0,796	1,792	0,975	0,987
1,120	0,840	0,842	1,866	0,987	0,990
1,194	0,888	0,878	1,941	0,962	0,993
1,269	0,901	0,907	2,016	0,975	0,995
1,344	0,925	0,929	2,090	0,987	0,996
1,418	0,937	0,946			

Parâmetros S2 Repetição 3

P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
12,22	0,81	0,15	0,26	1,68	1,37

ANEXO E1 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de potássio (KNO_3), repetição 1 da amostra deformada do solo 1 (S1), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,079	0,000	0,000	1,662	0,986	0,993
0,158	0,000	0,000	1,742	1,014	0,996
0,237	0,000	0,000	1,821	0,986	0,998
0,317	0,000	0,000	1,900	1,000	0,999
0,396	0,000	0,001	1,979	0,986	0,999
0,475	0,011	0,009	2,058	1,014	1,000
0,554	0,022	0,038	2,137	1,014	1,000
0,633	0,087	0,105	2,217	1,014	1,000
0,712	0,217	0,210	2,296	1,028	1,000
0,792	0,358	0,345	2,375	0,959	1,000
0,871	0,497	0,485	2,454	1,028	1,000
0,950	0,613	0,615	2,533	1,000	1,000
1,029	0,696	0,724	2,612	1,014	1,000
1,108	0,808	0,810	2,692	1,000	1,000
1,187	0,881	0,873	2,771	0,972	1,000
1,267	0,932	0,918	2,850	0,986	1,000
1,346	0,959	0,948	2,929	0,986	1,000
1,425	0,972	0,967	3,008	0,986	1,000
1,504	0,959	0,980	3,087	1,000	1,000
1,583	0,959	0,988	3,167	1,000	1,000

Parâmetros S1 Repetição 1

P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
28,29	0,91	0,52	0,38	0,72	1,38

ANEXO E2 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de potássio (KNO_3), repetição 2 da amostra deformada do solo 1 (S1), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,077	0,000	0,000	1,627	0,989	0,978
0,155	0,000	0,000	1,704	1,000	0,986
0,232	0,000	0,000	1,782	1,000	0,991
0,310	0,000	0,000	1,859	0,978	0,994
0,387	0,000	0,001	1,937	1,011	0,997
0,465	0,000	0,007	2,014	1,011	0,998
0,542	0,037	0,030	2,092	1,000	0,999
0,620	0,133	0,083	2,169	1,000	0,999
0,697	0,145	0,166	2,247	1,011	1,000
0,775	0,263	0,276	2,324	0,989	1,000
0,852	0,402	0,396	2,401	1,000	1,000
0,930	0,527	0,518	2,479	0,989	1,000
1,007	0,617	0,626	2,556	1,011	1,000
1,085	0,706	0,720	2,634	1,011	1,000
1,162	0,805	0,795	2,711	1,000	1,000
1,239	0,815	0,853	2,789	1,011	1,000
1,317	0,946	0,897	2,866	0,989	1,000
1,394	0,913	0,929	2,944	0,989	1,000
1,472	0,957	0,952	3,021	1,000	1,000
1,549	0,989	0,967	3,099	0,989	1,000

Parâmetros S1 Repetição 2

P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
24,02	0,96	0,85	0,72	0,85	1,35

ANEXO E3 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de potássio (KNO_3), repetição 3 da amostra deformada do solo 1 (S1), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,076	0,000	0,000	1,972	1,034	0,984
0,152	0,000	0,000	2,048	1,023	0,988
0,228	0,000	0,000	2,124	1,000	0,991
0,303	0,000	0,001	2,199	1,011	0,993
0,379	0,000	0,008	2,275	1,000	0,995
0,455	0,039	0,031	2,351	1,000	0,996
0,531	0,090	0,077	2,427	1,023	0,997
0,607	0,177	0,146	2,503	1,000	0,998
0,683	0,251	0,232	2,579	1,011	0,998
0,758	0,335	0,327	2,654	1,046	0,999
0,834	0,418	0,424	2,730	0,989	0,999
0,910	0,511	0,517	2,806	1,000	0,999
0,986	0,580	0,602	2,882	0,989	0,999
1,062	0,660	0,676	2,958	1,000	1,000
1,138	0,716	0,740	3,034	1,011	1,000
1,213	0,762	0,793	3,109	0,989	1,000
1,289	0,830	0,836	3,185	1,034	1,000
1,365	0,864	0,872	3,261	1,034	1,000
1,441	0,898	0,900	3,337	1,000	1,000
1,517	0,977	0,923	3,413	0,989	1,000
1,593	0,943	0,940	3,489	1,011	1,000
1,668	0,966	0,954	3,564	1,000	1,000
1,744	1,011	0,965	3,640	1,034	1,000
1,820	1,000	0,973	3,716	1,034	1,000
1,896	1,011	0,979	3,792	1,011	1,000

Parâmetros S1 Repetição 3

P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
13,91	0,96	0,68	1,00	1,47	1,32

ANEXO F1 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de potássio (KNO_3), repetição 1 da amostra deformada do solo 2 (S2), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,077	0,000	0,001	1,154	0,808	0,804
0,154	0,000	0,027	1,231	0,820	0,826
0,231	0,041	0,099	1,308	0,855	0,845
0,308	0,135	0,193	1,385	0,855	0,862
0,385	0,275	0,287	1,462	0,891	0,877
0,462	0,385	0,376	1,539	0,867	0,890
0,539	0,480	0,454	1,616	0,903	0,902
0,615	0,551	0,523	1,693	0,879	0,912
0,692	0,597	0,582	1,769	0,903	0,921
0,769	0,679	0,634	1,846	0,903	0,929
0,846	0,726	0,678	1,923	0,903	0,936
0,923	0,726	0,717	2,000	0,891	0,943
1,000	0,772	0,750	2,077	0,939	0,948
1,077	0,761	0,779	2,154	0,939	0,954
Parâmetros S2 Repetição 1					
P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
2,78	0,82	0,17	1,27	7,37	1,41

ANEXO F2 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de potássio (KNO_3), repetição 2 da amostra deformada do solo 2 (S2), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,073	0,000	0,001	1,166	0,595	0,530
0,146	0,000	0,018	1,239	0,572	0,549
0,219	0,025	0,060	1,312	0,606	0,567
0,291	0,037	0,111	1,385	0,618	0,584
0,364	0,037	0,164	1,457	0,618	0,599
0,437	0,074	0,214	1,530	0,618	0,614
0,510	0,170	0,260	1,603	0,606	0,628
0,583	0,275	0,302	1,676	0,606	0,641
0,656	0,378	0,341	1,749	0,630	0,653
0,729	0,435	0,376	1,822	0,630	0,664
0,802	0,515	0,407	1,895	0,630	0,675
0,874	0,538	0,436	1,967	0,618	0,685
0,947	0,560	0,462	2,040	0,630	0,695
1,020	0,595	0,487	2,113	0,641	0,704
1,093	0,583	0,509	2,186	0,630	0,713
Parâmetros S2 Repetição 2					
P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
0,78	2,35	0,07	1,79	26,36	1,33

ANEXO F3 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de potássio (KNO_3), repetição 3 da amostra deformada do solo 2 (S2), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,071	0,000	0,000	2,050	1,000	0,986
0,141	0,000	0,000	2,121	1,000	0,988
0,212	0,000	0,008	2,192	0,989	0,990
0,283	0,064	0,039	2,263	1,011	0,992
0,354	0,128	0,100	2,333	1,000	0,993
0,424	0,202	0,180	2,404	0,989	0,994
0,495	0,287	0,272	2,475	0,989	0,995
0,566	0,347	0,365	2,545	1,000	0,996
0,636	0,430	0,452	2,616	0,989	0,997
0,707	0,511	0,534	2,687	0,989	0,997
0,778	0,603	0,606	2,757	1,000	0,998
0,848	0,660	0,668	2,828	1,034	0,998
0,919	0,728	0,722	2,899	1,046	0,998
0,990	0,773	0,768	2,970	1,011	0,999
1,061	0,818	0,806	3,040	1,000	0,999
1,131	0,830	0,839	3,111	1,011	0,999
1,202	0,852	0,866	3,182	1,011	0,999
1,273	0,886	0,889	3,252	1,046	0,999
1,343	0,909	0,907	3,323	1,023	0,999
1,414	0,920	0,923	3,394	1,011	1,000
1,485	0,932	0,936	3,465	1,011	1,000
1,556	0,966	0,947	3,535	1,000	1,000
1,626	0,966	0,956	3,606	1,023	1,000
1,697	0,977	0,964	3,677	1,011	1,000
1,768	0,966	0,970	3,747	1,034	1,000
1,838	1,000	0,975	3,818	1,011	1,000
1,909	1,000	0,979	3,889	1,011	1,000
1,980	1,000	0,983			

Parâmetros S2 Repetição 3

P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
6,90	0,77	0,22	0,65	2,97	1,29

ANEXO G1 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de cálcio ($Ca(NO_3)_2$), repetição 1 da amostra indeformada do solo 1 (S1), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,082	0,000	0,000	1,395	0,897	0,910
0,164	0,000	0,000	1,477	0,948	0,928
0,246	0,000	0,006	1,559	0,948	0,943
0,328	0,064	0,034	1,641	0,959	0,955
0,410	0,126	0,096	1,723	0,969	0,965
0,492	0,186	0,184	1,805	0,979	0,972
0,574	0,279	0,287	1,887	0,979	0,978
0,656	0,380	0,391	1,969	0,969	0,983
0,738	0,477	0,490	2,051	0,969	0,986
0,820	0,572	0,579	2,133	0,979	0,989
0,902	0,644	0,656	2,215	0,979	0,991
0,984	0,715	0,722	2,297	0,990	0,993
1,067	0,786	0,777	2,379	1,000	0,995
1,149	0,857	0,821	2,461	1,000	0,996
1,231	0,867	0,857	2,543	1,000	0,997
1,313	0,877	0,886			
Parâmetros S1 Repetição 1					
P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
8,57	0,83	0,11	0,26	2,33	1,23

ANEXO G2 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de cálcio ($Ca(NO_3)_2$), repetição 2 da amostra indeformada do solo 1 (S1), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,086	0,000	0,000	1,727	0,922	0,897
0,173	0,000	0,000	1,814	0,947	0,915
0,259	0,000	0,002	1,900	0,960	0,929
0,345	0,064	0,015	1,986	0,947	0,941
0,432	0,089	0,049	2,073	0,960	0,951
0,518	0,161	0,105	2,159	1,000	0,959
0,605	0,219	0,180	2,245	1,000	0,966
0,691	0,285	0,262	2,332	1,000	0,972
0,777	0,350	0,349	2,418	0,987	0,977
0,864	0,413	0,432	2,504	1,000	0,981
0,950	0,497	0,511	2,591	1,000	0,984
1,036	0,518	0,582	2,677	1,000	0,987
1,123	0,580	0,645	2,763	1,000	0,989
1,209	0,666	0,700	2,850	1,000	0,991
1,295	0,754	0,748	2,936	1,000	0,992
1,382	0,777	0,788	3,023	1,000	0,994
1,468	0,812	0,823	3,109	1,000	0,995
1,554	0,884	0,852	3,195	0,987	0,996
1,641	0,909	0,877	3,282	1,000	0,996
Parâmetros S1 Repetição 2					
P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
8,00	0,55	0,11	0,26	2,37	1,23

ANEXO G3 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de cálcio ($Ca(NO_3)_2$), repetição 3 da amostra indeformada do solo 1 (S1), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,082	0,000	0,000	1,477	0,930	0,941
0,164	0,000	0,000	1,559	0,930	0,954
0,246	0,000	0,007	1,641	0,940	0,964
0,328	0,076	0,039	1,723	0,952	0,972
0,410	0,133	0,108	1,805	0,973	0,978
0,492	0,202	0,203	1,887	1,006	0,983
0,574	0,296	0,312	1,969	0,952	0,987
0,656	0,403	0,421	2,051	1,000	0,990
0,738	0,506	0,522	2,133	1,000	0,992
0,820	0,606	0,611	2,215	1,000	0,994
0,902	0,683	0,686	2,297	1,000	0,995
0,984	0,758	0,750	2,379	1,000	0,996
1,067	0,833	0,802	2,461	1,000	0,997
1,149	0,863	0,843	2,543	1,000	0,998
1,231	0,898	0,877	2,625	1,000	0,998
1,313	0,909	0,903	2,707	1,000	0,999
1,395	0,919	0,924			

Parâmetros S1 Repetição 3

P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
8,78	0,80	0,12	0,27	2,28	1,23

ANEXO H1 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de amônio (NH_4NO_3), repetição 1 da amostra indeformada do solo 1 (S1), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,082	0,000	0,000	0,738	0,442	0,448
0,164	0,063	0,000	0,820	0,551	0,563
0,246	0,075	0,000	0,902	0,672	0,663
0,328	0,075	0,007	0,984	0,739	0,745
0,410	0,088	0,037	1,067	0,807	0,811
0,492	0,112	0,104	1,149	0,854	0,862
0,574	0,195	0,204	1,231	0,950	0,900
0,656	0,310	0,324			
Parâmetros S1 Repetição 1					
P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
14,59	0,83	0,04	0,06	1,37	1,23

ANEXO H2 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de amônio (NH_4NO_3), repetição 2 da amostra indeformada do solo 1 (S1), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,082	0,000	0,000	1,723	1,000	0,955
0,164	0,000	0,000	1,805	1,014	0,965
0,246	0,054	0,003	1,887	1,000	0,972
0,328	0,081	0,021	1,969	1,000	0,978
0,410	0,132	0,067	2,051	1,000	0,982
0,492	0,193	0,141	2,133	1,000	0,986
0,574	0,263	0,234	2,215	1,000	0,989
0,656	0,331	0,334	2,297	1,000	0,991
0,738	0,418	0,432	2,379	1,000	0,993
0,820	0,481	0,524	2,461	1,000	0,994
0,902	0,566	0,605	2,543	1,000	0,996
0,984	0,630	0,676	2,625	1,000	0,996
1,067	0,696	0,737	2,707	1,000	0,997
1,149	0,763	0,787	2,789	1,000	0,998
1,231	0,822	0,828	2,871	1,000	0,998
1,313	0,871	0,862	2,953	1,000	0,999
1,395	0,921	0,890	3,035	1,000	0,999
1,477	0,973	0,912	3,118	1,000	0,999
1,559	0,960	0,930	3,200	1,000	0,999
1,641	1,000	0,944	3,282	1,000	0,999

Parâmetros S1 Repetição 2

P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
9,03	0,89	0,39	0,85	2,21	1,23

ANEXO H3 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de amônio (NH_4NO_3), repetição 3 da amostra indeformada do solo 1 (S1), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,082	0,000	0,000	0,902	0,788	0,804
0,164	0,078	0,008	0,984	0,835	0,845
0,246	0,116	0,060	1,067	0,871	0,877
0,328	0,164	0,161	1,149	0,896	0,903
0,410	0,278	0,284	1,231	0,921	0,923
0,492	0,396	0,406	1,313	0,947	0,939
0,574	0,510	0,517	1,395	1,014	0,952
0,656	0,603	0,611	1,477	1,000	0,962
0,738	0,688	0,689	1,559	1,000	0,970
0,820	0,743	0,753	1,641	1,000	0,976
Parâmetros S1 Repetição 3					
P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
5,99	0,65	0,48	0,48	3,34	1,23

ANEXO I1 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de potássio (KNO_3), repetição 1 da amostra indeformada do solo 1 (S1), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,082	0,000	0,000	2,133	0,950	0,984
0,164	0,000	0,001	2,215	0,963	0,987
0,246	0,038	0,014	2,297	0,975	0,989
0,328	0,063	0,059	2,379	0,975	0,991
0,410	0,112	0,135	2,461	1,000	0,993
0,492	0,207	0,231	2,543	0,987	0,994
0,574	0,310	0,333	2,625	1,000	0,995
0,656	0,431	0,431	2,707	1,025	0,996
0,738	0,529	0,522	2,789	0,987	0,997
0,820	0,628	0,601	2,871	1,000	0,997
0,902	0,705	0,670	2,953	1,013	0,998
0,984	0,750	0,728	3,035	1,013	0,998
1,067	0,796	0,777	3,118	1,000	0,999
1,149	0,819	0,818	3,200	1,000	0,999
1,231	0,842	0,851	3,282	1,000	0,999
1,313	0,866	0,878	3,364	1,000	0,999
1,395	0,890	0,901	3,446	1,000	0,999
1,477	0,902	0,919	3,528	1,000	0,999
1,559	0,902	0,934	3,610	1,000	1,000
1,641	0,938	0,946	3,692	1,000	1,000
1,723	0,938	0,956	3,774	1,013	1,000
1,805	0,975	0,964	3,856	1,013	1,000
1,887	0,987	0,971	3,938	1,025	1,000
1,969	0,963	0,976	4,020	1,000	1,000
2,051	0,938	0,981	4,102	1,013	1,000

Parâmetros S1 Repetição 1

P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
6,90	0,82	0,17	0,49	2,90	1,23

ANEXO I2 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de potássio (KNO_3), repetição 2 da amostra indeformada do solo 1 (S1), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,082	0,000	0,000	1,969	0,959	0,942
0,164	0,000	0,000	2,051	0,949	0,952
0,246	0,000	0,000	2,133	0,959	0,960
0,328	0,063	0,005	2,215	0,969	0,967
0,410	0,100	0,022	2,297	0,969	0,973
0,492	0,112	0,058	2,379	0,969	0,978
0,574	0,161	0,113	2,461	0,979	0,982
0,656	0,208	0,184	2,543	0,979	0,985
0,738	0,276	0,264	2,625	0,969	0,988
0,820	0,343	0,346	2,707	0,979	0,990
0,902	0,409	0,428	2,789	0,979	0,992
0,984	0,462	0,505	2,871	0,969	0,993
1,067	0,504	0,576	2,953	0,979	0,994
1,149	0,576	0,639	3,035	0,990	0,995
1,231	0,667	0,695	3,118	0,990	0,996
1,313	0,738	0,743	3,200	0,979	0,997
1,395	0,818	0,785	3,282	1,000	0,997
1,477	0,858	0,820	3,364	0,990	0,998
1,559	0,908	0,850	3,446	0,990	0,998
1,641	0,929	0,876	3,528	0,990	0,999
1,723	0,939	0,897	3,610	1,000	0,999
1,805	0,939	0,915	3,692	1,000	0,999
1,887	0,949	0,929			

Parâmetros S1 Repetição 2

P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
9,40	1,08	0,36	0,36	2,13	1,23

ANEXO I3 – Valores obtidos em laboratório e ajustados para confecção da curva de distribuição de nitrato, para nitrato de potássio (KNO_3), repetição 3 da amostra indeformada do solo 1 (S1), e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**	**VP**	**C/C_0 Observado**	**C/C_0 Ajuste**
0,086	0,000	0,000	1,814	0,912	0,929
0,173	0,000	0,000	1,900	0,935	0,941
0,259	0,038	0,007	1,986	0,956	0,950
0,345	0,063	0,033	2,073	0,969	0,959
0,432	0,112	0,088	2,159	0,984	0,966
0,518	0,148	0,163	2,245	0,987	0,971
0,605	0,206	0,251	2,332	0,997	0,976
0,691	0,310	0,341	2,418	1,000	0,980
0,777	0,433	0,428	2,504	1,000	0,983
0,864	0,526	0,510	2,591	1,000	0,986
0,950	0,614	0,582	2,677	0,997	0,988
1,036	0,675	0,646	2,763	1,001	0,990
1,123	0,741	0,702	2,850	0,997	0,992
1,209	0,757	0,749	2,936	1,000	0,993
1,295	0,789	0,789	3,023	1,000	0,994
1,382	0,811	0,824	3,109	0,997	0,995
1,468	0,820	0,853	3,195	1,000	0,996
1,554	0,838	0,877	3,282	1,000	0,997
1,641	0,868	0,897	3,368	0,997	0,997
1,727	0,879	0,914	3,454	1,000	0,998

Parâmetros S1 Repetição 3

P	R	v (cm min^{-1})	D (cm^2 min^{-1})	λ (cm)	ρ (kg dm^{-3})
6,94	0,97	0,02	0,05	2,74	1,23